

# **Estudo da Eficiência Energética de um Sistema de Arrefecimento com Materiais de Mudança de Fase**

*André Costa Nogueira dos Santos*

**Relatório de Dissertação do MIEM**

Orientador na FEUP: Prof. José Luis Coelho Alexandre



**FEUP**

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**

**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Junho 2013



## Resumo

A União Europeia estabeleceu como objectivo a partir do ano 2020 todos os novos edifícios apresentarem balanço de energia zero. Edifício de Balanço de energia zero (NZEB) é aquele em que a produção de energia no edifício iguala o seu consumo. Para que se atinja este objectivo proposto pela UE surge a necessidade de reduzir os consumos energéticos dos edifícios incluindo os consumos para a climatização do mesmo.

A utilização de materiais de mudança de fase (PCM) para reduzir as necessidades energéticas tem ganho relevância nos últimos anos, sobretudo em edifícios de baixa inércia. O PCM devido à sua capacidade de armazenar grandes quantidades de energia durante a mudança de fase permite reduzir as flutuações de temperatura dentro do edifício, funcionando como uma massa térmica, e reduzindo assim as necessidades energéticas associadas à climatização.

Neste trabalho é estudada uma ideia inovadora de integração dos encapsulamentos de PCM já existentes no mercado. O PCM é incorporado num grupo de tubos de aço inox onde circula água servindo dois propósitos: aumentar o coeficiente de transferência de calor e permitir a recuperação da capacidade de armazenamento do PCM. Os tubos de aço inox são posicionados no tecto e usados para arrefecer o espaço.

Foi desenvolvido um modelo matemático para representar o sistema recorrendo ao método da capacidade térmica para simular o fenómeno de mudança de fase. Inicialmente usou-se o programa Engineering Equation Solver (EES) para fazer uma análise paramétrica do sistema. Esta análise incidiu sobre a configuração do sistema, a velocidade do escoamento do fluido de transferência de calor e a temperatura de mudança de fase do PCM. Através desta análise definiram-se as características que optimizam o desempenho do sistema. O modelo matemático foi posteriormente introduzido num software de simulação energética, o EnergyPlus, sendo este utilizado para simular o comportamento do sistema e determinar a sua capacidade. Simulou-se ainda um sistema convencional composto por um chiller e um ventilo-convector que foi utilizado como referência para avaliar os resultados do sistema PCM.

Os resultados demonstraram que o sistema PCM permite reduzir o consumo de energia eléctrica 25,1% quando comparado com o sistema convencional.





## **Energy Efficiency Study of a Cooling System with Phase Change Materials**

### **Abstract**

The European Union established as an objective that from 2020 forward every new building will have to present zero energy balance. A Zero Energy Balance Building (NZEB) is a building which the production of energy equals its consumption. In order to fulfill that objective arises a need to reduce energy consumption in buildings, including energy consumption in its HVAC systems.

Use of phase change materials (PCM) to reduce the energy necessities has become in the last few year, mainly in buildings with low thermal mass. The PCM, thanks to its ability to store large amounts of energy heat during phase change, allows to reduce the temperature fluctuations within the building, acting as thermal mass, and reducing that way the heating and cooling energy necessities.

In this work a new idea for the integration of the currently commercially available PCM encapsulations is studied. The PCM is integrated in an inox steel pipe where there is a water flow serving two purposes: increase the heat transfer coefficient and help in the recovery of PCM storage capacity. The inox steel pipe is installed on the ceiling and used for cooling the space.

A mathematical model was developpe to represent the system using the thermal capacity method to simulate the phase change phenomenon. Initially a parametric analysis was made using Engineering Equation Solver (EES). The parameters analyzed were system configuration, heat transfer fluid flow speed and phase change temperature of the PCM. The results provided the best configuration in order to optimize system's performance. The mathematical model was then incorporated into an energy simulation software, EnergyPlus, which was used to simulate the behavior of the system and determine its capacity. A conventional system was also tested and used as a benchmark for comparison with the PCM system.

Results showed that the PCM system provided a reduction of 25,1% in electricity consumption when compared to a conventional system.



## **Agradecimentos**

Deixo aqui o meu agradecimento a todas as pessoas que me ajudaram a realizar este trabalho.

Em primeiro lugar quero agradecer ao Professor José Luis Alexandre pela sua confiança e orientação que tornou possível a realização deste trabalho.

À Universidade do Illinois e ao Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory por desenvolverem e me permitirem utilizar o programa de simulação EnergyPlus, e em especial à Engenheira Linda Lawrie por todo o seu apoio.

Também gostaria de agradecer a todos os meus colegas que contribuíram com o seu tempo e as suas ideias para me ajudar a ultrapassar as dúvidas que foram surgindo ao longo do trabalho.

Por último agradeço a todos os meus amigos e família que sempre me apoiaram e me ajudaram sempre que necessário.



## Índice de Conteúdos

1	Introdução .....	1
1.1	Contexto .....	1
1.2	Objectivos.....	3
1.3	Estado da Arte.....	3
1.3.1	Materiais de Mudança de Fase (PCM).....	3
1.3.2	Classificação de PCMs.....	4
1.3.3	Aplicações de PCMs.....	6
1.4	Estrutura do Trabalho.....	14
2	Modelo do Sistema.....	15
2.1	Descrição do Sistema .....	15
2.2	Modo de Funcionamento.....	15
2.3	Configurações .....	16
2.4	Modelo matemático .....	19
2.4.1	Elaboração de modelo físico .....	20
2.4.1.1	Fluido de transferência de calor .....	20
2.4.1.2	Análise do PCM .....	23
2.5	Correlações para os coeficientes de transferência de calor .....	28
3	Estudo Paramétrico.....	31
3.1	Configuração do sistema.....	32
3.2	Velocidade de escoamento do FTC.....	33
3.3	Temperatura de mudança de fase do PCM.....	34
4	Simulação Energética do Sistema.....	35
4.1	Breve Descrição do EnergyPlus.....	35
4.2	Edifício modelo .....	36
4.2.1	Características da Envolvente.....	37
4.2.2	Condições de funcionamento .....	39
4.2.3	Necessidades Térmicas do Espaço .....	41
4.3	Implementação do sistema PCM no EnergyPlus.....	44
4.4	Validação Numérica .....	50
4.5	Simulação do Sistema Convencional.....	52
5	Análise da Eficiência do Sistema.....	55
5.1	Sistema PCM.....	55
5.2	Sistema Convencional.....	58
6	Discussão dos Resultados .....	59
7	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	61
8	Referências Bibliográficas .....	63
ANEXO A:	Programa Desenvolvido no EES.....	67

ANEXO B:	Módulo do Sistema PCM (EnergyPlus) .....	72
ANEXO C:	Tabela de Capacidade de Arrefecimento .....	88

## Índice de Figuras

Figura 1 – Diferentes classes de PCM .....	5
Figura 2 - Representação do sistema para armazenamento de energia free-cooling concebido por Yanbing et al. ....	7
Figura 3 - Esquema do protótipo desenvolvido por Zalba para aproveitamento de free-cooling .....	8
Figura 4 - Esquema do sistema de climatização desenvolvido por Turnpenny et al. ....	9
Figura 5 - Composição de ambas as paredes estudadas por Kuznik .....	11
Figura 6 - Esquema do sistema de arrefecimento desenvolvido por Wang e Niu .....	12
Figura 7 - Imagens do protótipo testado por Koschenz e Lehmann .....	13
Figura 8 - Representação do sistema de climatização e dos seus modos de funcionamento. ....	16
Figura 9 - Diferentes tipos de encapsulamento de PCM disponíveis no mercado .....	17
Figura 10 - Três configurações do sistema escolhidas para o estudo.....	18
Figura 11 - Representação esquemática do sistema .....	20
Figura 12 - Representação simplificada do sistema reduzido a metade por razão de simetria .....	20
Figura 13 – Representação do volume de controlo do FTC.....	22
Figura 14 - Formato triangular da função da Capacidade Térmica do PCM .....	25
Figura 15 - Representação da malha de elementos aplicada ao PCM.....	25
Figura 16 - Representação dos elementos de topo e fundo e respectivas condições de fronteira .....	26
Figura 17 - Análise do calor trocado pelo sistema para diferente número de elementos da malha .....	27
Figura 18 - Evolução da capacidade de arrefecimento do sistema para diferentes configurações.....	32
Figura 19 – Capacidade de arrefecimento do sistema para diferentes velocidades do fluido .....	33
Figura 20 – Capacidade de arrefecimento para diferentes temperaturas de mudança de fase .....	34
Figura 21 - Estrutura geral do programa EnergyPlus.....	36
Figura 22 – Vista isométrica da casa modelo desenhado no Google SketchUp .....	37
Figura 23 - Vistas das fachadas Sul e Este da casa modelo .....	38
Figura 24 - Perfil da taxa de ocupação .....	40
Figura 25 - Taxa de utilização para equipamentos .....	40
Figura 26 - Intervalo de conforto térmico para as condições de Verão segundo a norma ASHRAE 55-2004.....	41
Figura 27 - Variação da carga térmica de arrefecimento no espaço a climatizar .....	42

Figura 28 - Variação da temperatura no espaço a climatizar, em regime free-floating .....	43
Figura 29 - Fluxograma que representa a estrutura do módulo que simula o sistema PCM .....	47
Figura 30 - Diagrama de AVAC para o sistema PCM simulado no EnergyPlus .....	48
Figura 31 - Comparação dos resultados do modelo EES e do modelo EnergyPlus para a temperatura do PCM .....	51
Figura 32 - Comparação dos resultados do modelo EES e do modelo EnergyPlus para a temperatura da água .....	51
Figura 33 - Comparação dos resultados do modelo EES e do modelo EnergyPlus relativamente capacidade de arrefecimento do sistema .....	52
Figura 34 - Diagrama de AVAC para o sistema convencional simulado no EnergyPlus .....	53
Figura 35 - Variação da temperatura do ar no interior do espaço para o funcionamento do sistema utilizando um PCM com mudança de fase aos 21 °C.....	56
Figura 36 - Capacidade de arrefecimento do sistema com temperatura de mudança de fase 21 °C.....	57

## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Comparação entre calor armazenado num PCM e em materiais convencionais para o intervalo de temperaturas de conforto térmico.....	3
Tabela 2 - Aplicações de PCM.....	6
Tabela 3 – Dimensões de placas e tubos disponíveis no mercado para encapsulamento de PCMs.....	17
Tabela 4 - Propriedades dos materiais de mudança de fase utilizados neste estudo .....	18
Tabela 5 - Rácios da massa de PCM por metro de tubagem para cada configuração do sistema [33] .	19
Tabela 6 - Características da envelope da casa modelo, construção de baixa inércia [44] .....	38
Tabela 8 - variáveis de entrada e saída do módulo que simula o Sistema com PCM .....	46
Tabela 9 - Características referência do chiller .....	49
Tabela 10 - Diferentes modos de funcionamento estudados e suas características.....	55
Tabela 11 - Resultados das simulações de conforto térmico e consumo energético para ambas as estratégias propostas.....	57
Tabela 12 -Resultados das simulações de conforto térmico e consumo energético para o sistema convencional .....	58



## Nomenclatura

### Caracteres Gregos

$\alpha$	Difusividade Térmica	$[m^2/s]$
$\Delta$	Intervalo	
$\beta$	Coeficiente de expansão	$[^{\circ}C^{-1}]$
$\lambda$	Condutibilidade Térmica	$[W/m.K]$
$\nu$	Viscosidade Cinemática	$[m^2/s]$
$\pi$	Número de Pi	

### Caracteres Romanos

<b>A</b>	Área	$[m^2]$
<b>c</b>	Capacidade térmica	$[J/K]$
<b>D</b>	Diâmetro	$[m]$
<b>dr</b>	Espessura do elemento PCM do tubo	$[m]$
<b>dy</b>	Espessura do elemento PCM da placa	$[m]$
<b>e</b>	Espessura	$[m]$
<b>E</b>	Energia	$[J]$
<b>f</b>	Factor de atrito de Darcy	
<b>g</b>	Aceleração gravítica	$[m/s^2]$
<b>H</b>	Calor latente específico	$[kJ/kg]$
<b>h</b>	Coeficiente de convecção	$[W/(m^2.K)]$
<b>L</b>	Comprimento característico	$[m]$
<b>m</b>	Massa	$[kg]$
<b>N</b>	Necessidades térmicas	$[kJ]$
<b>Nu</b>	Número de Nusselt	
<b>P</b>	Perímetro	$[m]$
<b>Pr</b>	Número de Prandtl	
<b>Q</b>	Potência calorífica	$[W]$
<b>r</b>	Raio	$[m]$
<b>Ra</b>	Número de Rayleigh	
<b>Re</b>	Número de Reynolds	
<b>t</b>	Variável temporal	$[s]$
<b>T</b>	Temperatura	$[^{\circ}C]$
<b>u</b>	Velocidade	$[m/s]$
<b>U</b>	Coeficiente de transmissão térmica	$[W/(m^2.K)]$
<b>x</b>	Comprimento	$[m]$

### Subscritos

<b>ar</b>	Propriedade relativa ao ar
<b>arrf</b>	Relativo ao Arrefecimento
<b>d</b>	Desenvolvimento
<b>e</b>	Entrada
<b>eff</b>	Relativo ao calor específico efectivo do PCM

<b>ext</b>	Exterior
<b>f</b>	Propriedade relativa ao Fluido
<b>h</b>	Hidráulico
<b>i</b>	Índice do elemento relativo ao PCM
<b>l</b>	Latente
<b>liq</b>	Relativo ao PCM no estado liquido
<b>p</b>	Sensível
<b>PCM</b>	Propriedade relativa ao PCM
<b>s</b>	Saída
<b>sol</b>	Relativo ao PCM no estado solido

#### **Sobrescritos**

<b>0</b>	Relativo ao Instante de tempo anterior ao processo de cálculo
<b>.</b>	Primeira derivada em relação ao tempo

#### **Abreviaturas**

<b>AVAC</b>	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
<b>EPBV</b>	Directive on the energy performance of buildings
<b>EU</b>	União Europeia
<b>FTC</b>	Fluido de Transferência de Calor
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>ITE 50</b>	Coefficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente de Edifícios
<b>nZEB</b>	nearly Zero-Energy Building
<b>PCM</b>	Phase Change Material
<b>RCCTE</b>	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
<b>RSECE</b>	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
<b>UTA</b>	Unidade de Tratamento de Ar

## 1 Introdução

### 1.1 Contexto

Na actualidade, a sociedade humana enfrenta uma crise energética. Desde o período da industrialização que se tem verificado uma expansão a nível tecnológico acompanhada por um aumento exponencial do consumo de energia, proveniente maioritariamente de combustíveis fósseis. Um estudo realizado pelo Eurostat indica que 79% da energia primária da União Europeia em 2006 era obtida com recurso a petróleo, carvão e gás natural [1]. Esta dependência excessiva dos combustíveis fósseis associada à sua escassez tem originado um aumento dos preços da energia. Nos países da União Europeia o preço da electricidade subiu em média 10% entre 2009 e 2011 [2].

A par da crise energética tem havido um agravamento das questões ambientais. Um estudo feito pelo IPCC<sup>1</sup> indica que o aquecimento global é “inequívoco”. Esse mesmo estudo verificou uma redução no número de dias e noites frios e uma maior ocorrência de ondas de calor. A principal causa para estas alterações no clima é a produção de gases de estufa devido a actividades humanas que aumentou 70% entre 1970 e 2004. Cerca de 60% desses gases advém do uso de combustíveis fósseis [3].

Como resposta a estes dois problemas tem havido uma crescente preocupação, liderada pelas instituições governamentais, para reduzir o consumo de combustíveis fósseis e os consequentes efeitos nocivos no ambiente. Uma das áreas onde existe um grande potencial de redução do consumo de combustíveis fósseis é nos edifícios, quer no processo de construção quer durante a sua utilização. Na UE, este sector é responsável por 40% do consumo energético [4] e quase 30% das emissões de CO<sub>2</sub> [5].

Ao nível da utilização dos edifícios uma das áreas com maior potencial para reduzir os consumos energéticos é o AVAC. Na UE 23% da electricidade gasta no sector residencial é

---

<sup>1</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) - corpo científico, sob os auspícios da Organização das Nações Unidas (ONU).

para AVAC, enquanto no sector terciário 30% da electricidade é consumida para esse mesmo efeito [6]. Em 2003 a UE criou uma directiva concernente à performance dos edifícios, a EPBD, em que estabelece objectivos a atingir na redução dos seus consumos energéticos e emissões de gases de estufa. A directiva incentiva à procura de soluções passivas para os sistemas de AVAC e estabelece como objectivo que a partir de 2020 todos os novos edifícios sejam nZEB (nearly Zero Energy Buildings) [7]. A directiva não estabelece uma definição concreta para um edifício ser considerado um nZEB, deixando essa questão para cada país definir consoante o seu clima e restantes condicionantes. A definição generalista para um ZEB é um edifício que tem um balanço energético zero, isto é, produz tanta energia quanto a que consome [8].

A UE também já demonstrou a sua preocupação com a possibilidade de reduzir os custos ambientais na fase de construção. Relatórios referentes ao ciclo de vida [9] e sustentabilidade [10] na construção foram elaborados em 2007 e 2011, respectivamente, a pedido da UE. Estes relatórios têm como principal objectivo analisar as medidas já tomadas pelos vários países e aconselhar nos passos a tomar para formar uma norma geral da UE, sendo que neste momento encontra-se em processo de aprovação a norma CEN/TC 350 que se refere à sustentabilidade na construção.

A procura por uma construção sustentável, com recurso a materiais de baixa pegada ecológica e que são tipicamente leves como a madeira, leva a soluções que apresentam baixa inércia térmica. Em países como Portugal onde existem grandes oscilações térmicas durante o dia um edifício com baixa inércia apresenta cargas térmicas mais elevadas e menor conforto térmico. A massa térmica deste tipo de edifícios pode ser aumentada com recurso a PCMs (Phase Change Materials). Os PCMs são substâncias com elevado calor latente de fusão que, mudando de fase a uma dada temperatura, consegue armazenar ou libertar grandes quantidades de energia. Devido à sua elevada massa térmica e temperatura de mudança de fase na região de conforto térmico, eles são capazes de minimizar o efeito de grandes oscilações da temperatura exterior nas condições interiores de um edifício. Eles permitem assim reduzir as cargas térmicas e transferir as necessidades de climatização para alturas fora do pico de procura, substituindo os materiais pesados e com elevada pegada ecológica como o betão.

Os PCMs assumem-se como uma solução para ambas as questões energéticas e ambientais permitindo reduzir as necessidades energéticas e contribuindo para uma construção sustentável.

## 1.2 Objectivos

Neste trabalho pretende-se estudar uma forma de aplicação inovadora dos PCMs consistindo na sua integração num sistema de arrefecimento. Através do modelo desenvolvido para simular o sistema pretende-se averiguar se a sua utilização é vantajosa em termos de eficiência energética quando comparado com um sistema convencional.

## 1.3 Estado da Arte

### 1.3.1 Materiais de Mudança de Fase (PCM)

Materiais de mudança de fase (PCM) são materiais de armazenamento de calor latente. Os PCMs armazenam energia a temperatura aproximadamente constante, durante a mudança de fase, ao contrário dos materiais de armazenamento convencionais (calor sensível). Na Tabela 1 é comparada a capacidade de armazenamento de energia de um PCM com a de materiais convencionais, betão e água. A comparação é feita para o intervalo de temperaturas 18-27 °C que envolve o intervalo de conforto térmico. O PCM, com temperatura de mudança de fase no intervalo de temperaturas seleccionado, apresenta uma capacidade de armazenamento por unidade de massa 5 a 20 vezes superior quando comparado com esses materiais.

Tabela 1 – Comparação entre calor armazenado num PCM e em materiais convencionais para o intervalo de temperaturas de conforto térmico

Material	Calor específico [kJ/kg.°C]	Calor latente [kJ/kg]	Energia Armazenada ( $\Delta T$ 18 – 27 °C) [kJ/kg]
Betão	0,96	-	8,64
Água	4,187	-	37,7
Parafina C <sub>13</sub> -C <sub>14</sub>	-	189	189

Os PCMs têm que apresentar adequadas propriedades térmicas, cinéticas e químicas para que possam ser usados como materiais de armazenamento de energia [11]:

- Propriedades Térmicas
  - Temperatura de mudança de fase adequada à aplicação;
  - Elevado calor latente;
  - Boa condutibilidade térmica;

- Propriedades cinéticas
  - Não ocorrência de sobrefusão;
  - Elevada taxa de cristalização;
- Propriedades químicas
  - Estabilidade química;
  - Compatibilidade com materiais de construção;
  - Não tóxico;
  - Não inflamável;

A temperatura de mudança de fase é escolhida consoante a aplicação pretendida. Para aplicações cujo objectivo é a climatização do espaço normalmente a temperatura ideal encontra-se próxima do intervalo de conforto térmico, na região 18-27 °C. O calor latente deve ser elevado de forma a permitir o uso de menor quantidade de material enquanto uma boa condutibilidade térmica facilita a carga e descarga do PCM.

A sobrefusão ocorre quando um material é arrefecido abaixo do seu ponto de fusão sem solidificar e é um dos principais problemas dos PCMs, sobretudo os hidratos de sal. A sua ocorrência por vezes chega a ser de magnitudes de 5-10 °C impedindo totalmente a extracção de calor latente.

### **1.3.2 Classificação de PCMs**

- PCMs Orgânicos

Os PCMs orgânicos, PCMs que contêm carbono na sua composição, podem ser divididos em parafinas e não-parafinas tal como se pode ver na Figura 1. Este tipo de materiais de mudança de fase apresentam fusão congruente e auto-nucleação, isto é, podem sofrer vários ciclos de mudança de fase sem que haja degradação da sua capacidade de armazenamento e cristalizam sem a ocorrência de sobrefusão.

- Parafinas

As Parafinas são constituídas por cadeias de alcanos. Quanto maior for a cadeia maior é também o calor latente e a temperatura de mudança de fase. As principais vantagens apresentadas por este tipo de PCM são a sua segurança, baixo custo, pequenas variações de volume durante a mudança de fase, baixa pressão de vapor no estado líquido e apresentarem estabilidade química abaixo dos 500 °C.

Contudo as Parafinas também apresentam algumas desvantagens que têm condicionado a sua utilização. Baixa condutibilidade térmica, incompatibilidade com alguns plásticos e serem moderadamente inflamáveis são as principais condicionantes.

- Não-Parafinas

Os PCMs orgânicos não-parafina são o grupo mais numeroso e podem ser adicionalmente divididos em ácidos gordos e outros. Em geral as propriedades de ambos os grupos de PCM orgânico são semelhantes. A principal diferença encontra-se no calor latente que é superior nos ácidos gordos comparativamente às parafinas. No entanto os ácidos gordos também apresentam desvantagens, sobretudo serem mais caros e mais inflamáveis que as parafinas.

- PCMs Inorgânicos

Os PCMs inorgânicos podem ser divididos em hidratos de sal e metálicos. Assim como os orgânicos, também os PCMs inorgânicos apresentam fusão congruente e auto-nucleação.

- Hidratos de sal

Este tipo de PCMs é formado através da dissolução de sais inorgânicos em água. A mudança de fase nos hidratos de sal é na realidade uma desidratação do sal, um processo que se assemelha em termos termodinâmicos a uma fusão. Este tipo de transformação provoca a formação de depósitos de sal no fundo do invólucro devido à diferença de densidades, o que torna o processo irreversível, e os hidratos de sal perdem parte da sua capacidade de armazenamento em cada ciclo, sendo este o seu principal defeito. Outro problema comum à maioria dos hidratos de sal é a ocorrência de sobrefusão devido às fracas propriedades de nucleação. Contudo este problema pode ser resolvido adicionando um agente de nucleação [12].

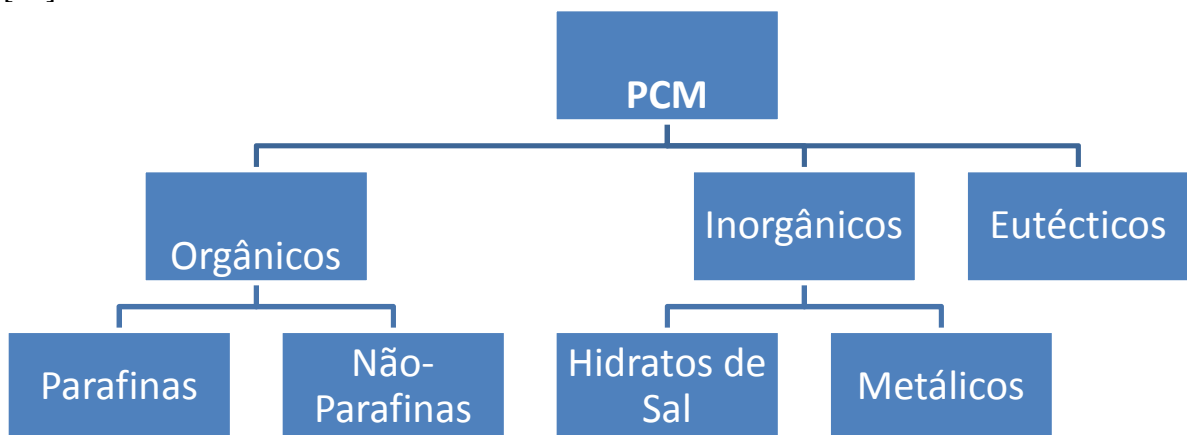


Figura 1 – Diferentes classes de PCM

Apesar dos seus problemas, os hidratos de sal também apresentam vantagens importantes que levam a que este seja um dos grupos de PCM mais estudados. As suas principais vantagens são a elevada condutibilidade comparativamente a outros PCMs (cerca do dobro das parafinas), elevado calor latente por unidade de volume e variações pequenas de volume durante a mudança de fase.

- Metálicos

Os metais com baixo ponto de fusão têm suscitado o interesse como PCM devido à sua grande condutibilidade e calor latente. Contudo o seu elevado peso inviabiliza a sua aplicação na maior parte dos casos.

- Eutéticos

Os eutéticos são compostos por dois componentes que fundem de forma congruente formando uma mistura durante a cristalização. Eles assumem propriedades semelhantes às dos componentes usados para formar o eutético.

### 1.3.3 Aplicações de PCMs

Os PCMs têm sido utilizados em diversas áreas. Em climatização o seu uso pode ser dividido em três grupos principais: armazenamento de energia térmica, inércia térmica e integrados em sistemas activos de climatização. A Tabela 2 indica os estudos realizados em cada uma das áreas de aplicação do PCM.

Tabela 2 - Aplicações de PCM

<b>Aplicação</b>	<b>Referências</b>
Armazenamento de Energia Térmica	[13-22]
Inércia Térmica	[23-28],[39-41]
Climatização Activa	[29-32]

- **Sistemas de Armazenamento**

Dentro das aplicações de PCM para armazenamento térmico, a sua utilização em sistemas para aproveitamento de free-cooling tem assumido especial importância e por isso esta secção é dividida em duas subsecções: aplicações free-cooling e outras.



- Free-cooling

Dá-se o nome de free-cooling à utilização, para arrefecimento, de ar exterior quando este se encontra a uma temperatura inferior à do ar interior e dessa forma não necessitando de despende energia excepto para ventilação caso ventilação natural não seja possível. Normalmente as condições necessárias para que se possa realizar free-cooling só ocorrem durante a noite, ou seja fora do pico das necessidades de arrefecimento. A utilização de sistemas especializados para aproveitar o free-cooling armazenando-o em PCMs para que possa ser usado durante o período de maiores necessidades de arrefecimento tem sido amplamente estudado.

Um sistema de ventilação nocturna com a integração de um depósito de PCM foi estudado por Yanbing et al.[13] com o objectivo de aumentar a eficiência energética dos edifícios aproveitando o free-cooling. O funcionamento do sistema consiste em fazer circular o ar frio nocturno pelos depósitos de PCM removendo calor dos mesmos e insuflando o ar aquecido no espaço (Figura 2). Durante o dia o ar do espaço é recirculado pelos PCMs que absorvem calor do ar sendo este novamente insuflado no espaço a uma temperatura inferior. Os autores criaram um modelo matemático para simular o sistema e posteriormente fizeram um teste experimental. Na instalação experimental, um espaço com 10 m<sup>2</sup>, os autores usaram 150 kg de um ácido gordo criado pelos mesmos com as seguintes propriedades térmicas: calor latente 190 kJ/kg, temperatura de mudança de fase 22 – 26°C. Os resultados experimentais provaram que com este sistema é possível reduzir a temperatura do espaço e aumentar os níveis de conforto.

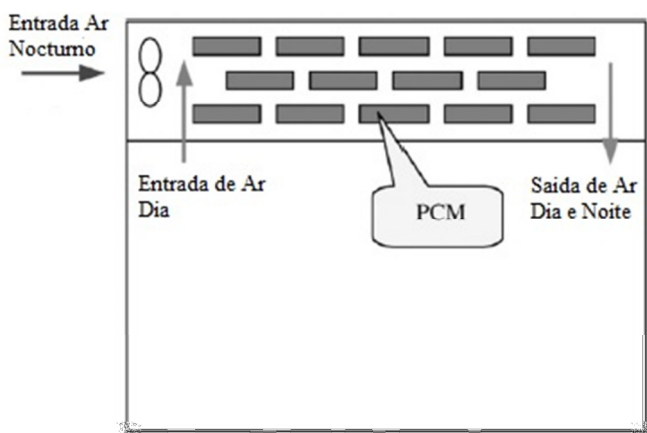


Figura 2 - Representação do sistema para armazenamento de energia free-cooling concebido por Yanbing et al.[13]

Um sistema semelhante foi estudado por Takeda et al.[14]. Os autores utilizaram 4,59 kg de PCM consistindo numa mistura de 65% materiais cerâmicos e 35% hidrocarboneto parafínico. O PCM foi instalado numa conduta de ventilação com o objectivo de reduzir a carga térmica proveniente das renovações de ar. Os autores testaram o sistema fazendo variar a temperatura de entrada do ar entre 21,5 e 28 °C de forma a simular as variações de temperatura do ar exterior. Os resultados mostraram que o sistema era capaz de estabilizar a temperatura e mantê-la próxima da temperatura de mudança de fase do PCM à saída da conduta. Após a análise experimental foram feitas simulações para o período de Verão em oito cidades japonesas. Verificou-se que o maior aproveitamento foi conseguido na cidade de Kyoto onde se reduziu a carga térmica de ventilação em 62,8%.

Um protótipo experimental de um permutador de calor com placas planas de PCM, representado esquematicamente na Figura 3, foi desenvolvido por Zalba et al.[15] com o intuito de analisar a influência de vários parâmetros na capacidade do sistema. Os principais parâmetros analisados foram: rácio calor latente/volume nos invólucros, a taxa de transferência de calor na carga e descarga do sistema e o custo da instalação. Nos testes foram utilizados 3 kg de uma parafina comercial da empresa Rubitherm com mudança de fase aos 25 °C. Os parâmetros que revelaram maior influência no funcionamento do sistema foram a espessura do invólucro, a temperatura de entrada do ar e o caudal de ar. O principal problema encontrado foi a baixa condutibilidade do PCM que dificulta a transferência de calor. Com o objectivo de responder a esse problema os autores propuseram a introdução de uma matriz gráfica no invólucro do PCM de forma a aumentar a taxa de transferência de calor[16]. Comparando ambos os sistemas concluíram que para a mesma espessura do invólucro o tempo de resposta é 50% menor no sistema com a grafite e a redução na quantidade de energia armazenada é muito pequena.

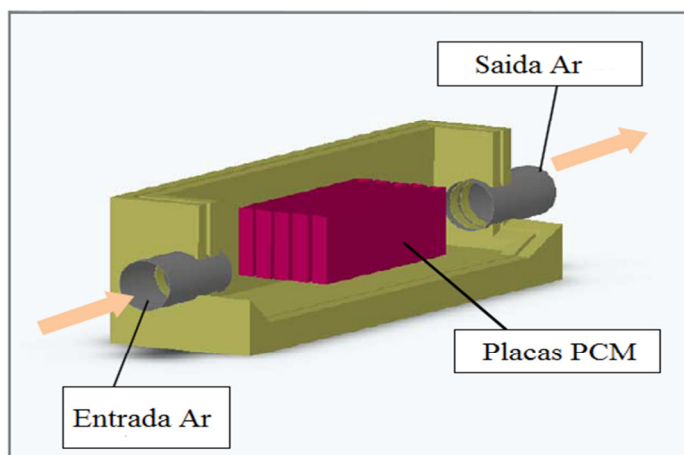


Figura 3 - Esquema do protótipo desenvolvido por Zalba [15] para aproveitamento de free-cooling

A influência do caudal e da temperatura de entrada do ar também foi estudada por Waqas e Kumar [17]. O sistema, consistindo numa unidade de armazenamento de energia composta por 13 kg dum PCM com mudança de fase aos 29 °C, foi instalado num ambiente controlado e testado experimentalmente. Os autores concluíram que o PCM é mais sensível à temperatura de entrada do ar em comparação com o caudal. Quando a temperatura de entrada foi reduzida de 22 °C para 20 °C, foi necessário 33% menos tempo para solidificar totalmente o PCM. No caso do caudal, uma mudança de 4 m<sup>3</sup>/h para 5 m<sup>3</sup>/h reduziu em 16% o tempo de solidificação. Num estudo semelhante, Stritih e Butala [18] utilizaram 3,6 kg de parafina com ponto de fusão 22 °C e 172 kJ/kg de calor latente e verificaram que o sistema era capaz de arrefecer o ar abaixo dos 24 °C durante 2,5 horas quando o fluxo de ar entrava a 26 °C com uma velocidade de 1 m/s.

Na Figura 4 está representado um sistema de climatização com PCM integrado desenvolvido por Turnpenny et al. [19]. O sistema é composto por uma unidade de PCM para armazenamento de energia térmica com tubos condutores de calor embutidos no mesmo. Uma parte desses tubos fica fora dos depósitos de PCM e é colocada uma ventoinha por baixo deles. Durante o dia o ar do espaço é recirculado e transfere calor para o PCM através dos tubos de calor. À noite é circulado ar frio do exterior que passa nos tubos e retira calor ao PCM solidificando-o. Um modelo teórico foi desenvolvido para testar o sistema. Para um período de 8 horas a capacidade de armazenamento do modelo é de 270 Wh. Os autores concluíram que para se conseguir derreter e congelar o PCM em intervalos de tempo práticos (7 – 10 h) é necessário uma diferença de temperaturas de 15 °C entre ar e PCM. Para diferenças de temperatura mais razoáveis, por exemplo 5 °C, o tempo necessário para ocorrer a fusão completa do material aumenta significativamente.

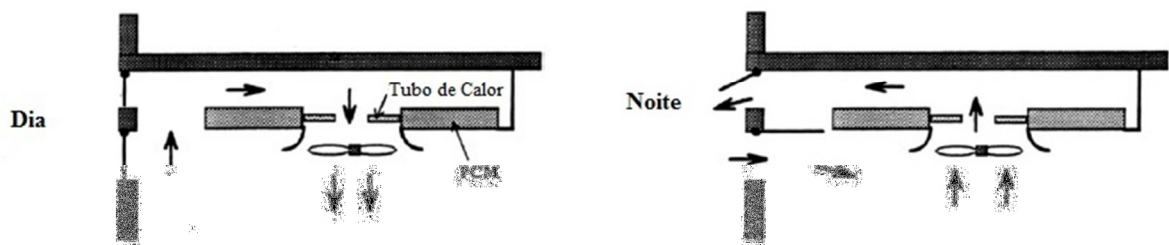


Figura 4 - Esquema do sistema de climatização desenvolvido por Turnpenny et al. [19]

Arkar et al. [20] fez um estudo para determinar as características óptimas de um sistema de armazenamento de energia free-cooling em esferas de PCM utilizando ar como fluido de transferência de calor. Ele determinou que a temperatura de mudança de fase deve ser entre 20 e 22 °C, as esferas de PCM devem ter 25 mm de diâmetro e a dimensão ideal é de 6,4 kg/m<sup>2</sup> de área de pavimento.

- Outras

Prakash et al. [21] estudou um sistema para aquecimento de água com armazenamento de energia utilizando PCM. O sistema, constituído por um depósito de água com uma camada de PCM no fundo, aproveita a radiação solar durante o dia para aquecer a água. Parte desse calor é transferido para o PCM. Durante a noite a água do depósito é substituída por água fria e a energia armazenada no PCM é transferida para a água aquecendo-a. O autor concluiu que este sistema não era eficiente devido à fraca transferência de calor entre PCM e água.

Outro sistema de armazenamento de calor com contacto directo entre o PCM e o fluido de transferência de calor foi estudado por Martin et al.[22]. Para um sistema deste tipo é necessário que o PCM seja insolúvel no fluido de transferência de calor. Uma análise paramétrica verificou que a diferença de temperaturas e o caudal de fluido são dois factores importantes.

- **Inércia Térmica**

Uma das principais aplicações de PCM é como massa térmica para edifícios de baixa inércia. O elevado calor latente destes materiais permite estabilizar a temperatura no interior dos espaços sem ser necessário grandes quantidades de material. A integração de PCM em materiais de construção comuns tem sido alvo de estudo por vários autores.

Com o objectivo de reduzir o sobreaquecimento em edifícios de baixa inércia, Voelker et al. [23] estudaram a possibilidade de aumentar a massa térmica desse tipo de edifícios adicionando PCM. Os autores criaram painéis de gesso com microcápsulas de parafina de 5 mm de diâmetro e ponto de fusão entre 25 e 28 °C e colocaram-nos num edifício de baixa inércia. Os resultados mostraram uma redução de 4 °C na temperatura de pico. Verificou-se também que a ocorrência de vários dias quentes consecutivos pode negar a capacidade de resposta do PCM, visto não permitir que este recupere a sua capacidade de armazenamento. Os autores sugerem que este problema pode ser resolvido através de uma eficiente ventilação nocturna.

Shilei et al. [24] e Kuznik et al. [25] (Figura 5) também estudaram experimentalmente o uso de microcápsulas de PCM para aumentar a massa térmica de edifícios. Estes autores aplicaram o PCM em placas de gesso para paredes. Os resultados demonstraram que o PCM tem excelente capacidade de armazenamento de energia e permite transferir as necessidades energéticas de períodos de pico para períodos de vazio. Quando comparada uma parede com PCM com outra sem, verificou-se que a parede com PCM resiste melhor a um sobreaquecimento e dessa forma melhora o conforto térmico devido aos efeitos radiativos.

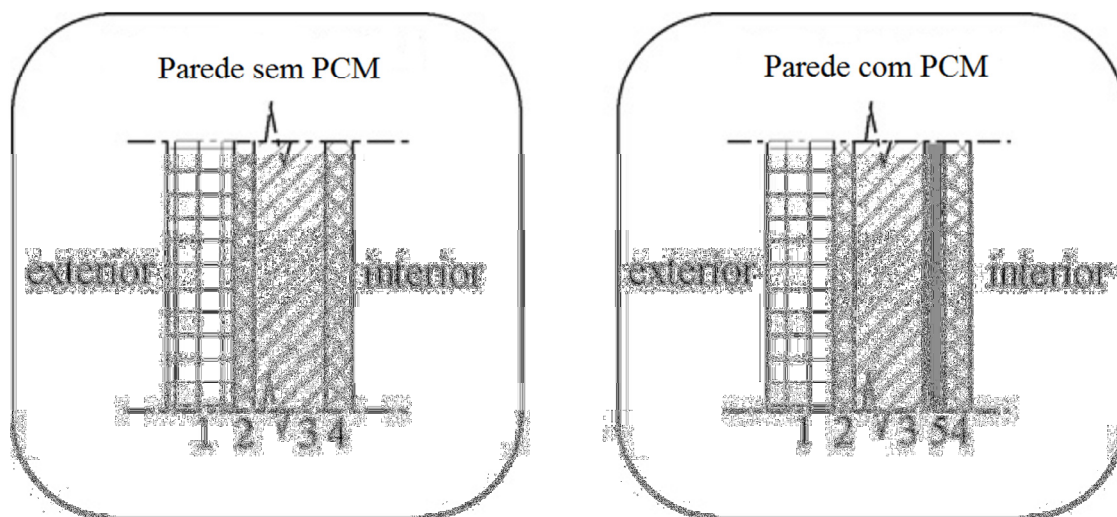


Figura 5 - Composição de ambas as paredes estudadas por Kuznik [25]: (1) 50 mm madeira, (2) 10 mm gesso, (3) 50 mm poliestireno, (4) 13 mm gesso e (5) 5 mm de PCM

Tijolos construídos com PCM no interior foram desenvolvidos e estudados experimentalmente por Castell et al. [26]. O estudo revelou que em regime de flutuação livre o uso destes tijolos leva a uma redução na temperatura de pico até 1°C. Uma análise comparativa entre dois cubículos, um com tijolos de PCM e outro com tijolos normais, climatizados através de uma bomba de calor mostrou um consumo de energia 15% menor no cubículo com PCM. Contudo foram observadas dificuldades em recuperar a capacidade de armazenamento do PCM durante a noite sem recurso a sistemas activos auxiliares. Zhang et al. [27] também investigaram o uso de tijolos preenchidos com PCM obtendo resultados semelhantes.

Um estudo do uso de painéis sandwich com PCM em paredes pré-fabricadas foi elaborado por Carbonari et al. [28]. Os resultados demonstraram que o uso de PCM pode ser útil para melhorar o comportamento térmico de edifícios de baixa inércia durante o Verão. Os autores testaram quatro protótipos diferentes e concluíram que a introdução de uma caixa-de-ar entre o PCM e a camada exterior metálica ajuda a melhorar a performance dos painéis.

- **Sistemas de Climatização Activos**

Um problema por vezes encontrado na aplicação de PCM é a necessidade de haver um ciclo carga/descarga para que ele possa ser reutilizado em dias consecutivos. Por vezes as oscilações de temperatura naturais não são suficientes para que ocorra um ciclo completo de carga/descarga. Para solucionar este problema tem sido estudada a possibilidade de integrar o PCM em sistemas activos de climatização. Desta forma é possível forçar a carga/descarga do PCM caso as condições ambiente não permitam que ela ocorra naturalmente.

Wang e Niu [29] estudaram a utilização de “slurries” de PCM como fluido de transferência de calor num sistema HVAC. Os “slurries” são fluidos compostos por água e PCM microencapsulado que devido à sua pequena dimensão não impede que o fluido possa ser bombeado. O sistema desenvolvido pelos autores é composto por duas partes representadas na Figura 6. A primeira parte funciona durante a noite e é um circuito de água ligado a um chiller e a um depósito onde está um “slurry” de PCM. Esta parte do sistema é usada para remover o calor do PCM utilizando o período nocturno quando a energia é mais barata e quando é mais rentável “produzir frio”. A segunda parte do sistema funciona durante o dia e consiste num tecto radiante ligado ao depósito do “slurry”. Durante o dia o fluido com o PCM é circulado e remove as cargas térmicas do espaço. O modelo matemático desenvolvido pelos autores foi utilizado para analisar a performance do sistema num escritório em Hong Kong. O PCM utilizado foi o Hexadecano com temperatura de fusão 18 °C e calor latente 224 kJ/kg. Os resultados obtidos mostraram que para um espaço com 18,4 m<sup>2</sup> virado a sul um tanque com 0,52 m<sup>3</sup> é suficiente para manter condições de conforto no interior. A nível energético o sistema reduz em 33% os consumos eléctricos no período de dia.

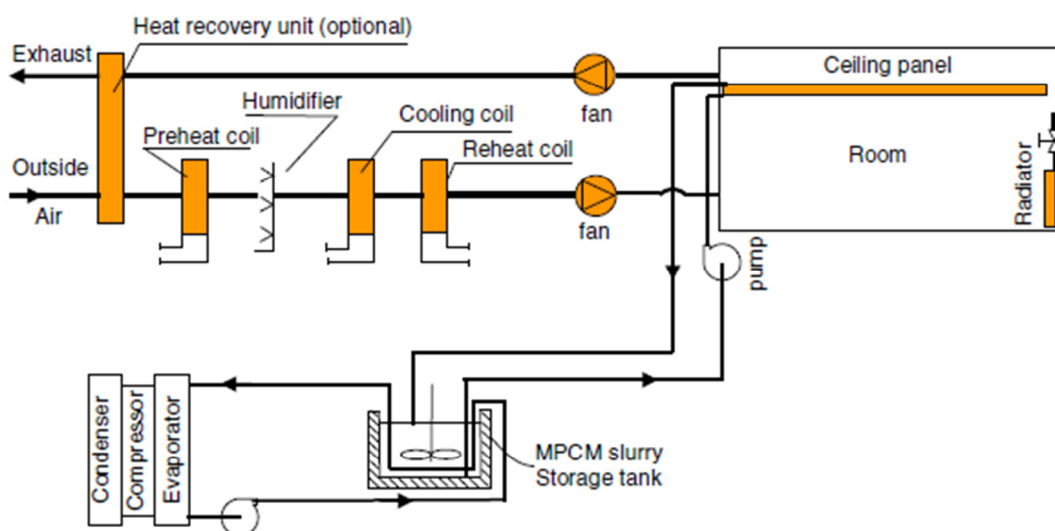


Figura 6 - Esquema do sistema de arrefecimento desenvolvido por Wang e Niu [29]

Outro sistema para transferir as necessidades de arrefecimento para o período da noite foi estudado por Kondo e Ibamoto [30]. Os autores estudaram o efeito de incorporar microcápsulas de PCM em placas de lã de rocha colocadas num tecto falso. Durante a noite ar frio vindo de uma UTA é circulado no tecto falso arrefecendo as placas com o PCM. Durante as horas de pico o ar do espaço passa pelo tecto falso antes de ser levado para a UTA e dessa forma o ar é pré-arrefecido. Com a introdução do PCM a carga térmica de pico é reduzida em 14,8% e o custo de funcionamento do sistema diminui 8,4%.

Koschenz e Lehmann [31] também estudaram a aplicação de PCM em painéis de tecto. Os autores utilizaram painéis feitos com gesso e microcápsulas de parafina e integraram nos painéis um sistema de tubos de água para auxiliar na recuperação do PCM. Os autores estudaram ainda a possibilidade de incorporar alhetas de alumínio para facilitar a transferência de calor entre o PCM, tal como se pode observar na Figura 7. Durante o dia os painéis removem calor do espaço e o PCM derrete e durante a noite é circulada água fria nos tubos embutidos nos painéis e é removido o calor do PCM solidificando-o. Os resultados experimentais demonstraram que uma composição para os painéis com 5 cm de espessura e 25% de massa em microcápsulas de PCM (parafina com mudança de fase a 22 °C) é suficiente para manter conforto num escritório.

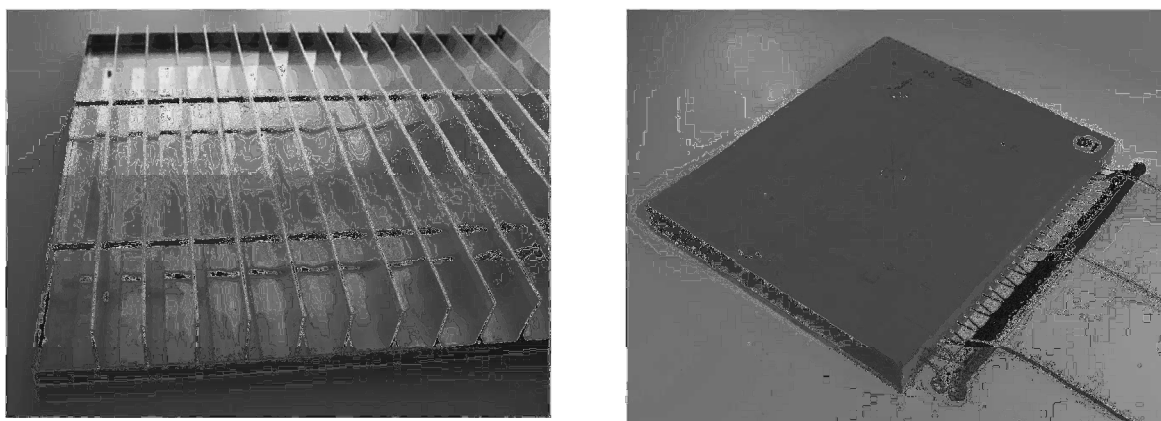


Figura 7 - Imagens do protótipo testado por Koschenz e Lehmann [31]

Um sistema semelhante mas para aplicação como pavimento radiante foi testado por Ansuini et al. [32]. O protótipo constituído por uma camada de PCM com tubos integrados foi testado para arrefecimento no Verão num espaço com 16 m<sup>2</sup> e apresentou uma redução de 25% da energia consumida.

#### **1.4 Estrutura do Trabalho**

O presente trabalho faz uma análise da eficiência energética de um sistema de climatização, com materiais de mudança de fase integrados, para edifícios de baixa inércia. O trabalho está dividido em sete capítulos principais que estão consequentemente divididos em vários subcapítulos.

O Capítulo 1 faz a introdução do trabalho situando-o no contexto da sociedade actual e apresentando as razões que motivaram a sua execução. Ainda neste capítulo é apresentado o Estado da Arte relativamente ao uso de materiais de mudança de fase na área de climatização.

No Capítulo 2 é apresentado o sistema em estudo. Este capítulo é dividido em duas partes, a Descrição do Sistema e o Modelo Matemático. Na Descrição do Sistema é apresentado o seu modo de funcionamento e as diferentes configurações que são estudadas. Na parte do modelo matemático são descritas as formulações matemáticas utilizadas para criar o modelo que permite simular o sistema.

No Capítulo 3 é apresentada uma análise paramétrica do sistema elaborada no programa Engineering Equation Solver (EES). Esta análise permitiu determinar as características que optimizam o desempenho do sistema.

O Capítulo 4 descreve os passos necessários para a introdução do modelo desenvolvido no software de simulação energética EnergyPlus. Em primeiro lugar é apresentada uma breve descrição do programa e do seu modo de funcionamento. Em seguida são apresentadas as características do edifício modelo criado no software para servir de caso de estudo para as simulações. Para finalizar, são apresentadas as rotinas criadas para simular o sistema no programa.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos no programa EnergyPlus e no Capítulo 6 é feita a discussão desses resultados.

Finalmente, o Capítulo 7 apresenta as conclusões gerais do trabalho e estabelece os objectivos para trabalhos futuros.



## **2 Modelo do Sistema**

### **2.1 Descrição do Sistema**

Neste trabalho é estudado um potencial sistema de climatização projectado para responder às necessidades de arrefecimento em edifícios de baixa inércia. O sistema é composto por um conjunto de tubos onde circula água e nos quais é incorporado PCM em cápsulas com várias geometrias. O PCM, devido à sua elevada capacidade de armazenamento de energia, acrescenta inércia térmica aos edifícios permitindo dessa maneira colmatar o problema dos edifícios que apresentam uma construção de baixa inércia térmica.

Contudo o PCM apresenta um problema, apenas consegue armazenar elevadas quantidades de energia térmica num intervalo curto de temperaturas, intervalo de mudança de fase. Por esta razão o PCM exige que ocorra uma oscilação de temperaturas durante o dia para completar o ciclo fusão/solidificação e recuperar a sua capacidade para responder às necessidades do espaço. Como resposta a este problema nos tubos circula um fluido de transferência de calor (FTC) que está ligado a um sistema de arrefecimento e permite dessa forma forçar a mudança de fase do PCM quando necessário. Neste trabalho utiliza-se as designações de carga e descarga quando se refere aos processos de solidificação e fusão do PCM respectivamente.

Neste estudo o FTC utilizado é água e o material escolhido para os tubos é o aço inox. A escolha do aço para os tubos deveu-se à sua elevada condutibilidade térmica, não apresentando uma resistência à transferência de calor. Relativamente ao PCM, foram analisados os tipos de encapsulamento disponíveis no mercado e estudadas as configurações consideradas mais adequadas para o sistema.

### **2.2 Modo de Funcionamento**

O sistema tem a possibilidade de funcionar em dois modos distintos (Figura 8): modo passivo e modo activo. No modo passivo o sistema de arrefecimento encontra-se desligado, existindo apenas recirculação do FTC para aumentar o coeficiente de transferência de calor. Este modo funciona durante o dia utilizando a inércia térmica do PCM para responder às necessidades do

espaço de forma passiva. Caso o funcionamento passivo do sistema não seja suficiente para responder às cargas do espaço o sistema de arrefecimento entra em funcionamento e o sistema passa para o modo activo.

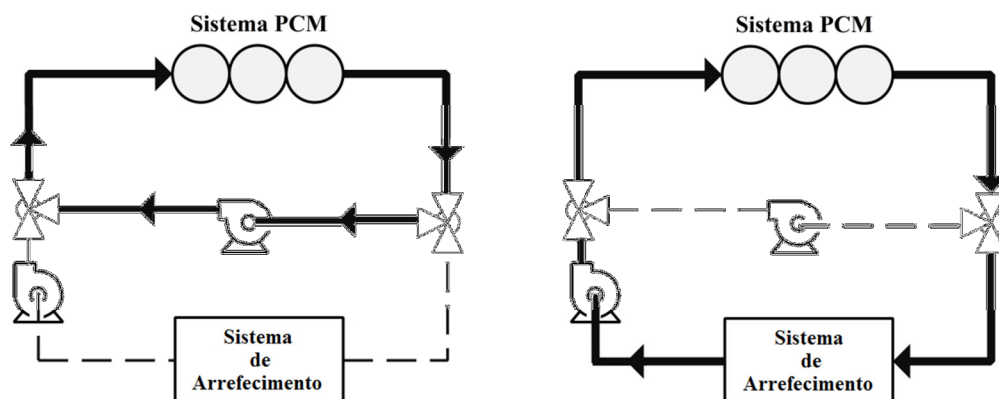


Figura 8 - Representação do sistema de climatização e dos seus modos de funcionamento.

Lado esquerdo - Modo passivo; Lado direito - Modo activo

No modo activo o sistema de arrefecimento encontra-se ligado e é utilizada para remover calor do FTC que em seguida circula pelo sistema PCM provocando a sua solidificação e completando o seu ciclo de utilização. Este modo funciona maioritariamente durante a noite servindo para preparar o sistema para responder de forma passiva às cargas térmicas do dia seguinte.

Com este modo de funcionamento pretende-se que o sistema seja capaz de preencher a lacuna entre o período em que ocorrem as necessidades de arrefecimento e o período em que é mais eficiente satisfazê-las. Utilizando o sistema em modo activo durante a noite, ao invés de durante o dia, não só permite aproveitar a tarifa reduzida da electricidade fora de pico como também permite tirar vantagem duma maior eficiência do sistema de arrefecimento devido às menores temperaturas exteriores.

### 2.3 Configurações

Como foi referido anteriormente, neste trabalho são utilizados encapsulamentos de PCM já disponíveis no mercado. Após uma pesquisa de mercado verificou-se que existe uma vasta gama de formatos em que se pode adquirir PCM. Na Figura 9 pode-se observar alguns exemplos de encapsulamentos disponibilizados pela empresa PCM Products Limited [33].



Figura 9 - Diferentes tipos de encapsulamento de PCM disponíveis no mercado

Esta empresa apresenta uma grande diversidade de oferta, quer ao nível do formato das cápsulas como também do PCM usado para as preencher, e por isso os seus produtos foram usados como base para a concepção do sistema em estudo. Entre os vários formatos disponíveis, foram considerados mais propícios à incorporação nos tubos de inox os encapsulamentos em formato de tubo e placa. Na Tabela 3 apresentam-se dimensões de diversos tubos e placas fornecidos pela empresa.

Tabela 3 – Dimensões de placas e tubos disponíveis no mercado para encapsulamento de PCMs [33]

<b>Placas</b>			
Comprimento [mm]	Largura [mm]	Espessura [mm]	Massa PCM [kg]
150	80	30	0,37
150	135	30	0,62
300	150	30	1,38
500	250	32	4,09
<b>Tubos</b>			
Comprimento [mm]	Diâmetro [mm]	-	Massa PCM [kg]
1000	50	-	2,7

Para a criação de configurações do sistema eliminou-se à partida as duas placas de maiores dimensões visto necessitarem de tubos com grandes diâmetros o que dificultaria a posterior integração do sistema no edifício. Com base nos restantes encapsulamentos propõe-se três configurações cuja secção transversal é apresentada na Figura 10.

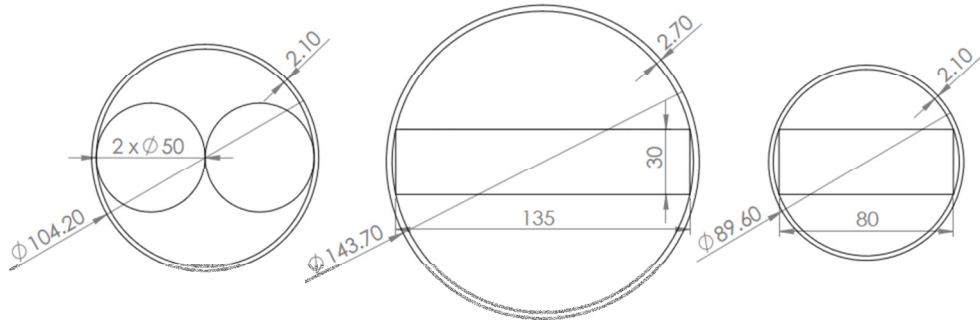


Figura 10 - Três configurações do sistema escolhidas para o estudo: Tubos, Placa Média e Placa Pequena

Para este estudo decidiu-se utilizar parafinas como PCM dado o maior período de vida que estas apresentam relativamente aos hidratos de sal. A empresa que comercializa os encapsulamentos de PCM utilizadas como base para as configurações do sistema disponibiliza uma vasta gama de parafinas com diferentes temperaturas de mudança de fase. Optou-se por simular duas parafinas, uma com mudança de fase aos 21 °C e outra aos 23 °C. Na Tabela 4 apresentam-se as propriedades das parafinas simuladas neste estudo, onde difere apenas a temperatura de mudança de fase de cada um dos PCMs.

Tabela 4 - Propriedades dos materiais de mudança de fase utilizados neste estudo

<b>Massa Volúmica</b> [kg/m <sup>3</sup> ]	785
<b>Calor Latente</b> [kJ/kg]	145
<b>Calor Sensível</b> [kJ/(kg.K)]	2,22
<b>Condutibilidade Térmica</b> [W/(m.K)]	0,18

#### • Dimensionamento do Sistema

O dimensionamento do sistema é feito com base na capacidade de armazenamento do PCM e nas necessidades de arrefecimento do espaço. Para o sistema cumprir o seu objectivo deve funcionar de forma passiva durante o dia e activa durante a noite, sendo para tal necessário que tenha capacidade de armazenar energia suficiente para satisfazer as necessidades de arrefecimento no dia crítico de Verão, considerado o dia que apresenta maiores necessidades energéticas de arrefecimento. Desta forma é possível calcular a massa de PCM necessária para cumprir esse objectivo recorrendo à equação (1).

$$m_{PCM} = \frac{N_{arrf}}{c_{l,PCM}} \quad (1)$$

Em que  $N_{arrf}$  são as necessidades de arrefecimento para o dia crítico de Verão em kJ e  $c_{l,PCM}$  é o calor latente do PCM em kJ/kg, ou seja a capacidade de armazenamento de energia por unidade de massa do PCM aquando da sua mudança de fase.

Após conhecimento da massa de PCM necessária no sistema, o comprimento de tubagens depende da configuração escolhida. Na Tabela 5 são apresentados os rácios de PCM por metro de tubagem para cada configuração. Estes valores são fornecidos pela empresa que fabrica as cápsulas [33]. O comprimento de tubagem é calculado recorrendo à equação (2).

Tabela 5 - Rácios da massa de PCM por metro de tubagem para cada configuração do sistema [33]

<b>Configuração</b>	<b>Rácio</b> [kg <sub>PCM</sub> /m <sub>tubo</sub> ]
Placa Pequena	2,5
Placa Média	4,1
Tubos	5,4

$$x_{sistema} = \frac{m_{PCM}}{Racio} \quad (2)$$

## 2.4 Modelo matemático

Os factores que têm influência no comportamento do sistema PCM podem ser divididos em três partes:

- 1) Espaço a climatizar;
- 2) Fluxo do fluido de transferência de calor;
- 3) Encapsulamentos preenchidos com PCM;

Numa primeira fase, apresentada neste capítulo, o objectivo centra-se apenas em estabelecer as equações necessárias para simular as trocas de calor no sistema em estudo, desprezando a sua influência nas condições do espaço.

Numa fase posterior, apresentada no capítulo 4, pretende-se analisar a influência do sistema nas condições térmicas do espaço em que está inserido. Para esse efeito o modelo desenvolvido neste capítulo é introduzido num programa de simulação térmica de edifícios e sistemas, o EnergyPlus. O programa permite obter o efeito do sistema nas condições do espaço e dessa forma analisar a eficiência energética do sistema e a sua capacidade de manter condições de conforto térmico no espaço.

O sistema PCM pode ser representado de forma esquemática, Figura 11, como um tubo de comprimento  $x_{sistema}$  composto por uma faixa intermédia de PCM e um fluxo de FTC que circula em cima e em baixo desse PCM.

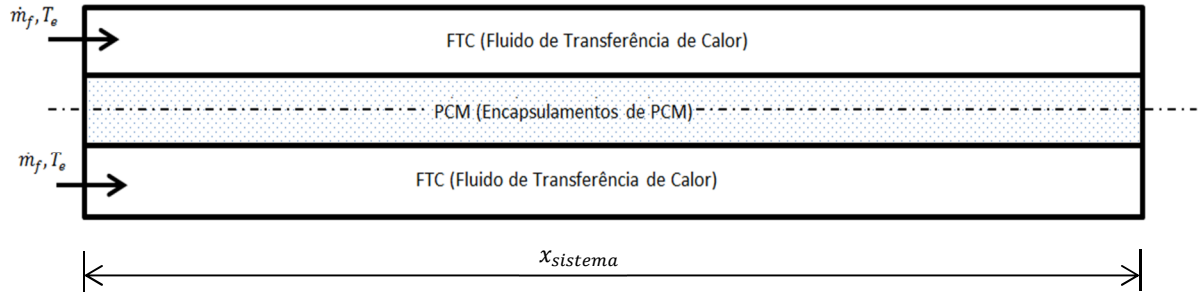


Figura 11 - Representação esquemática do sistema

Dada a simetria do sistema é possível simplificar ademais o esquema considerando apenas metade do mesmo, Figura 12. Desta forma reduz-se o trabalho computacional exigido.

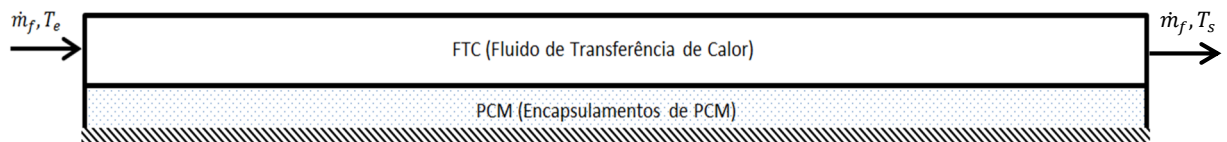


Figura 12 - Representação simplificada do sistema reduzido a metade por razão de simetria

#### 2.4.1 Elaboração de modelo físico

O FTC e o PCM apresentam características diferentes e foram abordados separadamente na formulação das equações. De uma forma geral as equações foram obtidas recorrendo a um balanço energético que é estabelecido pela primeira lei da termodinâmica como:

$$\dot{E}_{entrada} + \dot{E}_{gerada} = \dot{E}_{saida} + \dot{E}_{armazenada} \quad (3)$$

##### 2.4.1.1 Fluido de transferência de calor

- **Simplificações adoptadas**

- 1) Condução e armazenamento de calor no tubo de aço desprezado;

Esta simplificação é justificada devido à elevada condutibilidade apresentada pelo aço. A resistência térmica apresentada pelo tubo de aço corresponde apenas a % da resistência térmica que ocorre na convecção natural entre o tubo de aço e o ar. A capacidade térmica do aço também pode ser desprezada devido à pequena espessura do tubo (cerca de 2 mm) e consequentemente massa insignificante.

2) Escoamento turbulento e totalmente desenvolvido;

Um escoamento pode ser definido como laminar ou turbulento consoante o seu número de Reynolds. Num escoamento interno a transição entre os dois regimes ocorre para  $Re = 2300$ , ou seja, para que o escoamento seja turbulento é necessário  $Re > 2300$  [34]. Para uma velocidade entre 0,3 e 1,5 m/s, típica para sistemas de climatização que recorrem à circulação de água, o número de Reynolds é superior a 2300 para as três configurações em estudo.

Relativamente ao comprimento de desenvolvimento do fluxo, num escoamento turbulento este é obtido através da equação (4).

$$x_d > 10 \cdot D_h \quad (4)$$

Analisando as configurações em estudo verifica-se que a que apresenta maior diâmetro hidráulico é a configuração com placa média,  $D_h = 0,075$  m. Portanto este é o caso que apresenta maior comprimento de desenvolvimento,  $L_d = 0,75$  m. Este comprimento é suficientemente pequeno para permitir que se despreze os seus efeitos na análise global do sistema, visto para armazenar a energia necessária normalmente o comprimento do sistema ser superior a 10 m.

3) Condução axial negligenciável;

O principal gradiente de temperaturas ocorre na direcção normal ao tubo, sendo desprezável a transferência de calor na direcção axial.

- **Balço Térmico do Fluido de Transferência de Calor**

Na Figura 13 encontra-se representado o volume de controlo para o FTC e os fluxos de calor que entram no seu balanço térmico.

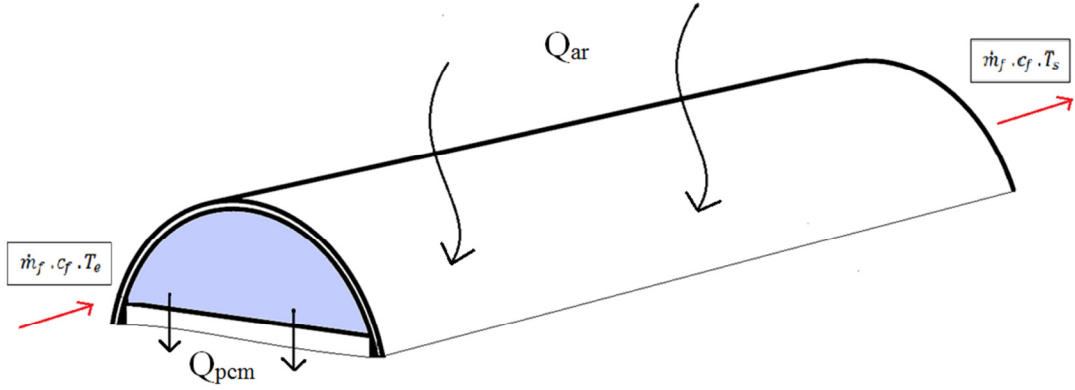


Figura 13 – Representação do volume de controlo do FTC

Considerando um escoamento interno, totalmente desenvolvido, o balanço energético para o fluido representado na Figura 13 pode ser escrito a partir da equação (3), sendo os seus componentes,

$$\dot{E}_{gerada} = 0 \quad (5)$$

$$\dot{E}_{entrada} = \dot{m}_f \cdot c_f \cdot T_e + \dot{Q}_{ar} \quad (6)$$

$$\dot{E}_{saida} = \dot{m}_f \cdot c_f \cdot T_s + \dot{Q}_{PCM} \quad (7)$$

$$\dot{E}_{armazenada} = 0 \quad (8)$$

onde,

$$\dot{Q}_{ar} = U_{ar} \cdot A_{ext} \cdot (T_{ar} - T_{p,Tubo}) \quad (9)$$

$$\dot{Q}_{PCM} = h_f \cdot A_{PCM} \cdot (T_f - T_{p,PCM}) \quad (10)$$

Em que  $A_{ext}$  é a área em contacto com o exterior,  $A_{PCM}$  a área do fluido em contacto com o PCM,  $T_{p,Tubo}$  é a temperatura da parede do tubo de aço que pode ser aproximada pela temperatura média do fluido,  $T_f = \frac{T_e + T_s}{2}$ ,  $T_{p,PCM}$  é a temperatura da parede do PCM em contacto com o fluido e  $Q_{ar}$  e  $Q_{PCM}$  são respectivamente o calor trocado com o espaço e o



calor trocado com o PCM. O coeficiente de transferência de calor  $U_{ar}$  é obtido através da equação (11). As correlações utilizadas no cálculo dos coeficientes de convecção  $h_{ar}$  e  $h_f$  são apresentadas no subcapítulo 2.5.

$$U_{ar} = \left( \frac{1}{h_{ar}} + \frac{1}{h_f} \right)^{-1} \quad (11)$$

Substituindo as equações (5) a (10) em (3) obtém-se,

$$\dot{m}_f \cdot c_f \cdot T_e + \dot{Q}_{ar} = \dot{m}_f \cdot c_f \cdot T_s + \dot{Q}_{PCM} \quad (12)$$

A equação (12) pode ainda ser reorganizada como,

$$U_{ar} \cdot A_{ext} \cdot (T_{ar} - T_f) = \dot{m}_f \cdot c_f \cdot (T_s - T_e) + h_f \cdot A_{PCM} \cdot (T_f - T_{p,PCM}) \quad (13)$$

#### 2.4.1.2 Análise do PCM

- **Simplificações adoptadas**

- 1) Capacidade térmica do encapsulamento desprezada;

Os encapsulamentos de PCM estudados neste trabalho são feitos de polietileno e têm cerca de 3 mm de espessura. Devido à sua pequena espessura o armazenamento de calor é desprezado.

- 2) Propriedades do PCM constantes em função da temperatura;

As propriedades do PCM são consideradas constantes, não alterando com mudanças de temperatura. Esta simplificação permite reduzir o trabalho exigido pelo modelo e já foi utilizada por outros autores sem apresentar erros relevantes.[14,19,32]

- 3) Condução axial negligenciável;

O principal gradiente de temperaturas ocorre na direcção normal ao tubo, sendo desprezável a transferência de calor na direcção axial. Esta condição foi verificada através do modelo EES, testado inicialmente para um sistema bidimensional, tendo-se verificado uma variação de apenas 0,01 °C na direcção axial do sistema comparado com uma variação superior a 2 °C na direcção normal.

#### 4) Convecção natural no PCM desprezada;

O sistema funciona sempre a temperaturas próximas da mudança de fase do PCM e por essa razão despreza-se os efeitos da convecção natural na fase líquida do PCM.

- **Balanço Térmico do PCM**

A presença de um fenómeno de mudança de fase no PCM exige cuidados especiais na sua modelação. Em 1890 Jožef Stefan desenvolveu o problema de Stefan. O problema de Stefan clássico visa descrever a distribuição de temperatura num meio homogéneo que se encontra em mudança de fase, por exemplo passando de gelo a água. Isto é realizado através da resolução da equação de calor impondo a distribuição de temperatura inicial no meio todo, e uma condição de fronteira particular, a condição de Stefan, na fronteira entre as duas fases. O método de resolução do problema de Stefan é a forma mais completa de descrever matematicamente os fenómenos que ocorrem durante a mudança de fase pois, tratando-se de um problema que envolve uma fronteira móvel, permite saber a localização da fronteira entre as diferentes fases. Contudo o facto de este ser um problema de fronteira móvel apresenta dificuldades na modelação o que leva a que sejam utilizados modelos simplificados quando as condições do estudo o permitem. O método da Entalpia [32-34] e o método da Capacidade Térmica [22,35-38] são dois modelos matemáticos largamente utilizados para simular numericamente a mudança de fase no PCM. Estes modelos podem ser usados quando a única preocupação relaciona-se com a mudança de fase como um fenómeno macroscópico, caso verificado neste estudo.

Neste trabalho, escolheu-se o método da Capacidade Térmica dada a sua simplicidade e facilidade de integração no modelo. Este método considera que a capacidade térmica do PCM durante a mudança de fase é dada por uma função da temperatura,  $c_{p,eff}(T)$ . Estudos anteriores [38] demonstraram que a função  $c_{p,eff}(T)$  para um PCM à base de parafinas apresenta um formato triangular (Figura 14).

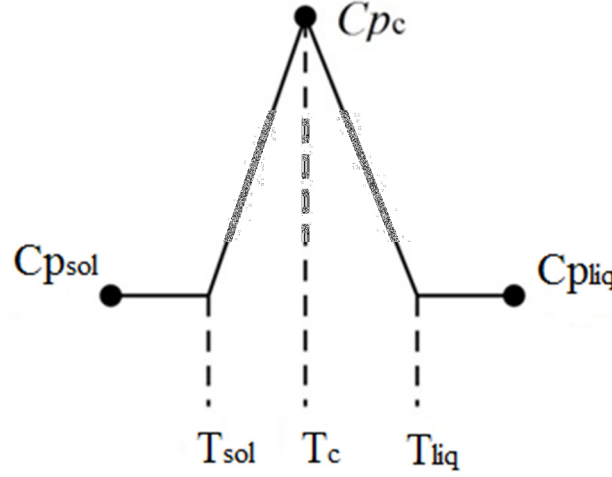


Figura 14 - Formato triangular da função da Capacidade Térmica do PCM durante a mudança de fase

Com base nesta observação é possível representar a função  $c_{p,eff}(T)$  segundo o sistema de equações (14).

$$\begin{cases} Cp_{eff} = \frac{4(H - Cp_{sol} \cdot b)}{b^2} \cdot (T - T_{sol}) + Cp_{sol} & \text{para } T_{sol} \leq T \leq T_c \\ Cp_{eff} = \frac{4(Cp_{sol} \cdot b - H)}{b^2} \cdot \left(T - \frac{b}{2} - T_{sol}\right) + \frac{2H}{b} - Cp_{liq} & \text{para } T_c \leq T \leq T_{liq} \end{cases} \quad (14)$$

Em que  $H$  é o calor latente do PCM,  $T_c = (T_{liq} + T_{sol})/2$  é a temperatura média do intervalo de mudança de fase e  $b = T_{liq} - T_{sol}$  representa o intervalo de temperaturas em que ocorre a mudança de fase.

Dada a complexidade do fenómeno de mudança de fase que ocorre no PCM este foi dividido em vários elementos de forma a permitir que esse fenómeno seja modelado com maior precisão. Tendo em conta que a transferência de calor ocorre maioritariamente na direcção normal ao tubo, foi definida uma malha uniaxial nessa direcção tal como se encontra representado na Figura 15.

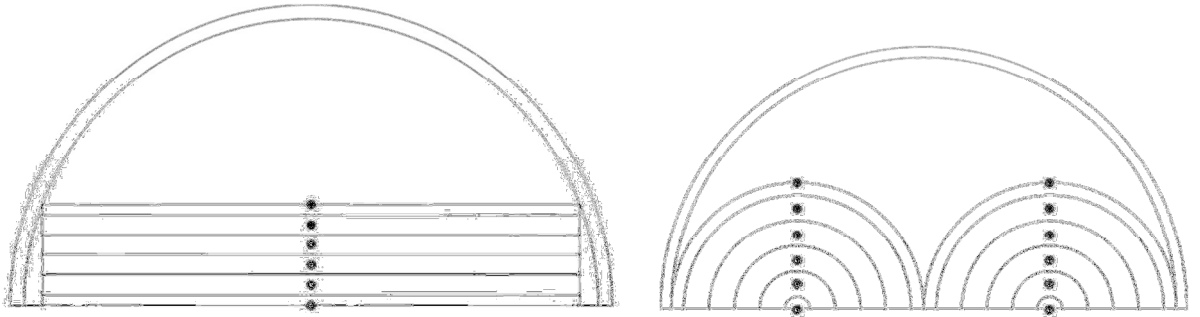


Figura 15 - Representação da malha de elementos aplicada ao PCM

Os elementos de topo e fundo têm condições de fronteira específicas e por essa razão têm um tratamento especial. Na Figura 16 apresenta-se um esquema dos elementos de topo e fundo para as configurações que utilizam um encapsulamento de placa. Considerou-se que estes elementos têm metade da espessura dos elementos intermédios, ficando o seu nó junto à fronteira do elemento. Esta consideração aumenta a sensibilidade do sistema para as condições de fronteira. A condição de fronteira no elemento de topo é de transferência de calor por convecção com o FTC enquanto no elemento de fundo a condição de fronteira é adiabática devido à existência de simetria no sistema.

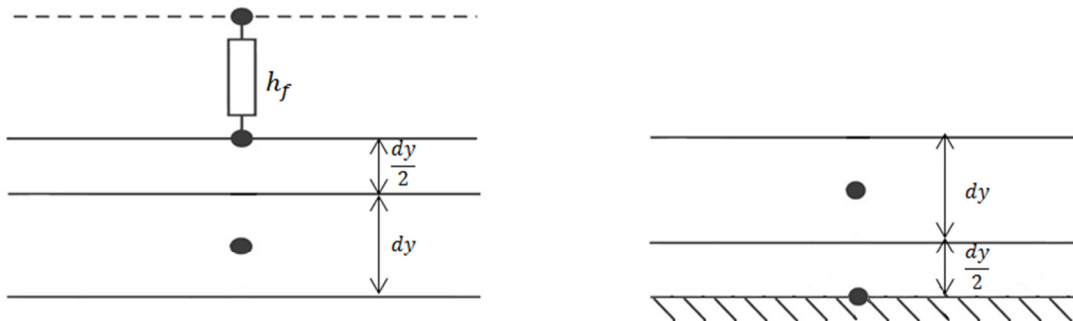


Figura 16 - Representação esquemática dos elementos de topo (esquerda) e fundo (direita) e respectivas condições de fronteira

Dadas as condições definidas para os nós de fronteira, a espessura de cada elemento intermédio,  $dy$ , é calculada recorrendo à equação (15), sendo que os elementos da fronteira têm metade dessa espessura.

$$dy = \frac{e_{Placa}}{N^{\circ} \text{ de elementos} - 1} \quad (15)$$

Utilizando um modelo simplificado analisou-se a influência do número de elementos da malha nos resultados obtidos. Na Figura 17 apresenta-se a variação do calor médio trocado entre o sistema e o ar em função do número de elementos da malha de PCM para uma placa de PCM com 30 mm de espessura. O estudo foi realizado para um período de 10 horas considerando a temperatura do ar a 26 °C e o PCM totalmente descarregado no início da simulação a uma temperatura de 20 °C. Os resultados mostram que para um número pequeno de elementos existem diferenças significativas no valor do calor trocado contudo a partir de 9 elementos a variação dos resultados é pequena.

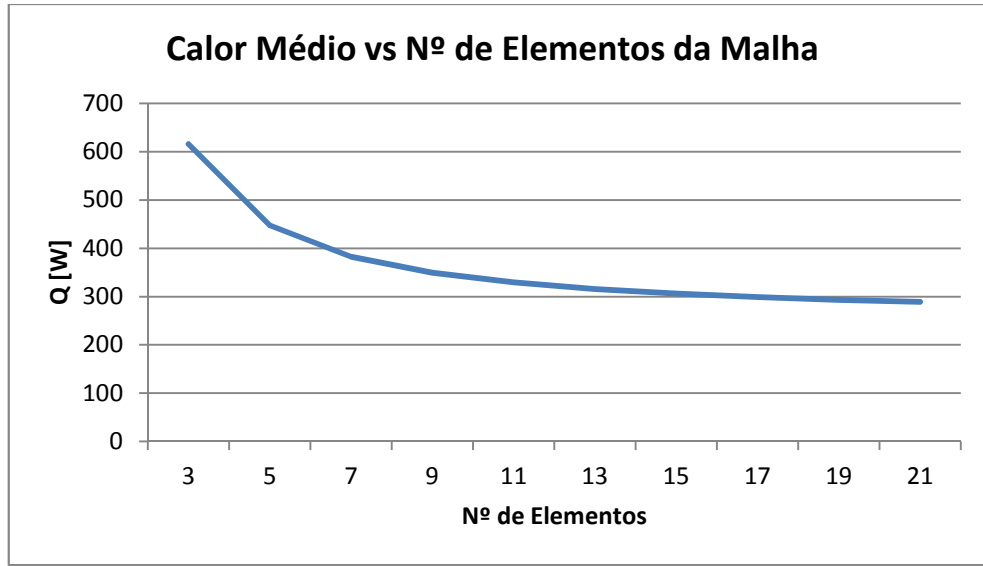


Figura 17 - Análise da variação do calor trocado pelo sistema para diferente número de elementos da malha

Tendo em conta a malha definida são necessárias três equações para representar o PCM, uma para o elemento de topo, uma para os elementos intermédios e uma para o elemento do fundo. Partindo da equação genérica para o balanço energético representada em (3) é possível obter as equações (16) que representam os vários elementos da malha do PCM.

$$\begin{aligned}
 h_f \cdot A_{PCM} \cdot (T_f - T_1) &= m_{PCM} \cdot c_{p,eff} \cdot \frac{T_1 - T_1^0}{\Delta t} + \lambda_{PCM} \cdot A_{PCM} \cdot \frac{T_1 - T_2}{dy} \\
 &\quad , \text{válida para o elemento do topo} \\
 \lambda_{PCM} \cdot A_{PCM} \cdot \frac{T_{i-1} - T_i}{dy} &= m_{PCM} \cdot c_{p,eff} \cdot \frac{T_i - T_i^0}{\Delta t} + \lambda_{PCM} \cdot A_{PCM} \cdot \frac{T_i - T_{i+1}}{dy} \\
 &\quad , \text{válida para os elementos intermédios } (2 \leq i < n) \\
 \lambda_{PCM} \cdot A_{PCM} \cdot \frac{T_{n-1} - T_n}{dy} &= m_{PCM} \cdot c_{p,eff} \cdot \frac{T_n - T_n^0}{\Delta t} \\
 &\quad , \text{válida para o elemento do fundo}
 \end{aligned} \tag{16}$$

Em que  $A_{PCM}$  a área de superfície do PCM e  $i$  representa o índice de cada elemento sendo que a sua numeração inicia-se no elemento de topo, elemento em contacto com o FTC, e termina no elemento do fundo, elemento em contacto com a fronteira adiabática.

A análise apresentada foi feita tendo em conta a configuração de placa PCM, contudo o processo para o caso da configuração de tubos PCM é idêntico obtendo-se as equações (17).

$$h_f \cdot A_{PCM} \cdot (T_f - T_1) = m_{PCM} \cdot c_{p,eff} \cdot \frac{T_1 - T_1^0}{\Delta t} + \lambda_{PCM} \cdot \pi \cdot L \cdot (r_1 + r_2) \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{dr}$$

, válida para o elemento do topo

$$\begin{aligned} \lambda_{PCM} \cdot \frac{\pi \cdot L \cdot (r_i + r_{i-1})}{2 \cdot dr} \cdot (T_{i-1} - T_i) \\ = m_{PCM} \cdot c_{p,eff} \cdot \frac{T_i - T_i^0}{\Delta t} + \lambda_{PCM} \cdot \pi \cdot L \cdot (r_i + r_{i+1}) \cdot \frac{(T_i - T_{i+1})}{2 \cdot dr} \end{aligned} \quad (17)$$

, válida para os elementos intermédios ( $2 \leq i < n$ )

$$\lambda_{PCM} \cdot \pi \cdot L \cdot r_n \cdot \frac{(T_{n-1} - T_n)}{dr} = m_{PCM} \cdot c_{p,eff} \cdot \frac{T_n - T_n^0}{\Delta t}$$

, válida para o elemento do fundo

O modelo matemático é então traduzido por um sistema de n+1 equações a n+1 incógnitas, sendo n o número de elementos em que é dividido o PCM.

## 2.5 Correlações para os coeficientes de transferência de calor

A escolha das correlações apropriadas para obter os coeficientes de transferência de calor é uma parte importante do modelo. Neste modelo existem dois coeficientes de convecção,  $h_{ar}$  e  $h_f$ , calculados recorrendo a correlações de transferências de calor.

Considerando que o sistema é aplicado num espaço isolado, sem correntes de ar, o coeficiente  $h_{ar}$  pode ser obtido recorrendo à correlação desenvolvida por Churchill e Chu (18) para o fenómeno de convecção natural no exterior de cilindros horizontais. Esta correlação é válida para  $10^{-5} < Ra < 10^{12}$ .

$$h_{ar} = \frac{\lambda_{ar}}{D_{ext}} \left( 0,6 + 0,387 Ra_D^{1/6} / \left( 1 + \left( \frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{8/27} \right)^2 \quad (18)$$

Em que,

$$Ra = \frac{g \cdot \beta}{\nu \cdot \alpha} \cdot (T_f - T_{ar}) \cdot D_{ext}^3 \quad (19)$$

Para a obtenção das propriedades do ar necessárias para a resolução da equação (18) é utilizada a temperatura média entre a temperatura do ar e da água,  $\frac{(T_f + T_{ar})}{2}$ .

O coeficiente de convecção para o escoamento do fluido no interior do tubo é calculado usando a equação,

$$h_f = Nu_D \cdot \frac{\lambda_f}{D_h} \quad (20)$$

Em que o numero de Nusselt ( $Nu_D$ ) é obtido através da correlação de Gnielinski (21), válida para  $3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$  e  $0.5 \leq Pr \leq 2000$  [34]. Esta correlação é aplicável para tubos lisos, com pequena diferença de temperatura entre a parede do tubo e o fluxo, condições verificadas neste modelo. É assumido como pressão estática  $p_f = 150$  kPa.

$$Nu_D = \frac{f}{8} \cdot (Re_D - 1000) \cdot Pr \left/ \left( 1 + 12.7 \cdot \left( \frac{f}{8} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left( Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right) \right) \right. \quad (21)$$

Onde  $f$  representa o factor de Darcy e Reynolds é dado por  $Re_D = \frac{u_f D_h}{\nu_f}$ . O diâmetro hidráulico é obtido por  $D_h = \frac{4A}{P}$ , onde  $A$  é a área da secção e  $P$  é o perímetro molhado da secção. As propriedades do fluido são obtidas utilizando a temperatura média do fluido,  $T_f$ .





### 3 Estudo Paramétrico

A análise do sistema PCM foi dividida em duas partes. A primeira parte consiste numa análise paramétrica do sistema realizada com o propósito de se definir as características que optimizam o seu desempenho. Esta análise foi feita recorrendo ao programa Engineering Equation Solver (EES), no anexo A apresenta-se o modelo desenvolvido para a configuração de placa pequena.

O EES é um programa de resolução de equações que permite resolver numericamente sistemas de equações diferenciais algébricas não-lineares. O programa também pode ser usado para resolver equações diferenciais e integrais, fazer optimização, fornecer análises de incerteza, executar regressões linear e não-linear, conversão de unidades, e gerar gráficos. Uma característica importante do EES que o torna apelativo na análise de modelos termodinâmicos é a base de dados de propriedades e correlações termodinâmicas e de transporte, de elevada precisão, que podem ser integradas directamente na resolução de equações.

Um dos problemas do EES é a sua baixa capacidade de cálculo que torna lenta a resolução de sistemas complexos, contudo na análise paramétrica interessa-nos apenas analisar a relação entre alguns parâmetros do sistema e os resultados obtidos, não sendo necessário para esse efeito um período de simulação alargado. Por essa razão nesta fase simulou-se apenas um período de 10 horas, intervalo de tempo em que o sistema se encontra em funcionamento passivo num dado dia. Considerou-se importante a análise de três parâmetros: a configuração do sistema, a velocidade do fluxo do fluido e a temperatura de mudança de fase do PCM.

### 3.1 Configuração do sistema

Na Figura 18 é apresentada a carga térmica por unidade de área removida do espaço para cada uma das configurações do sistema. Nesta simulação mantiveram-se constantes os restantes parâmetros considerando-se uma temperatura de mudança de fase do PCM de 21 °C e velocidade do fluido de 0,3 m/s. Verifica-se que a configuração de tubos apresenta uma capacidade de arrefecimento mais reduzida enquanto os sistemas de placa apresentam resultados semelhantes. Partindo destes resultados, os parâmetros seguintes foram analisados considerando-se a configuração de placa pequena, visto esta configuração ter menores dimensões.

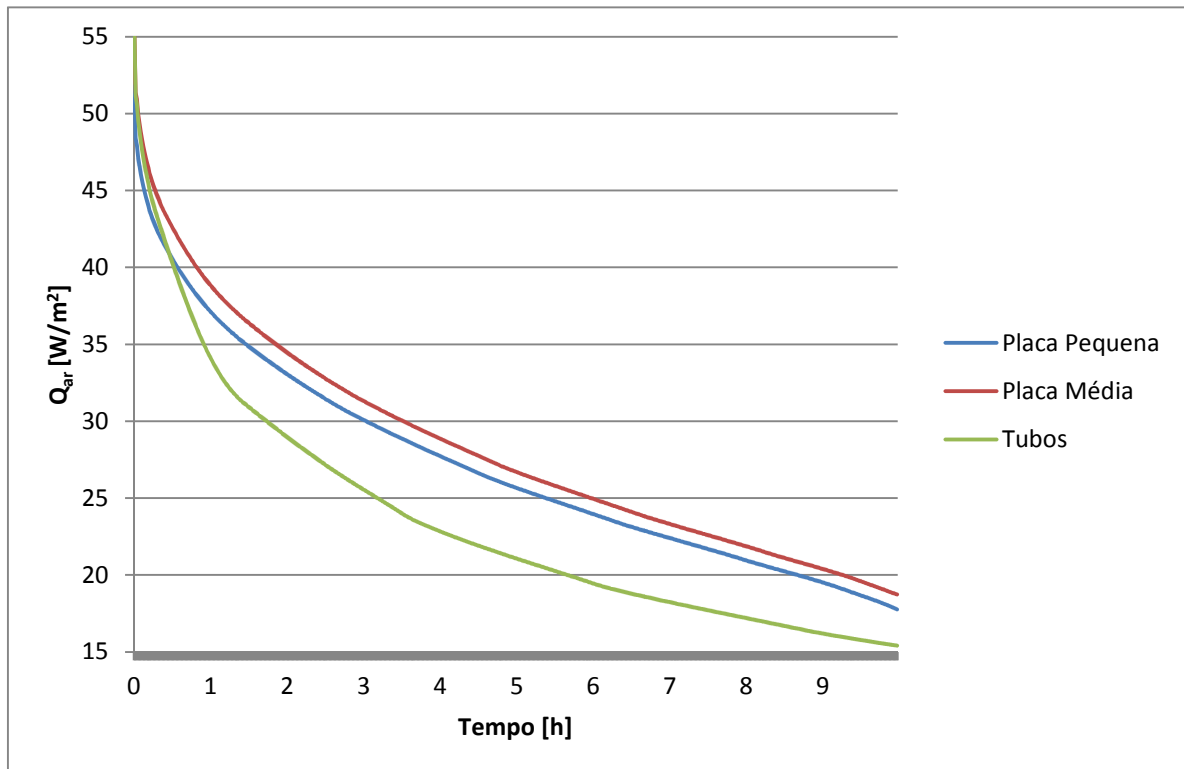


Figura 18 - Evolução da capacidade de arrefecimento do sistema para diferentes configurações

Relativamente ao tipo de configuração do sistema verificou-se que a utilização dos encapsulamentos em forma de tubo resulta numa pior capacidade do sistema. Este resultado pode ser justificado com a maior densidade de PCM por metro cúbico de tubagem desse tipo de configuração. A configuração de tubos apresenta uma densidade 38% superior à da placa pequena e 60% superior à da placa média. Esta diferença prejudica a eficiência do sistema visto que o PCM, devido à sua baixa condutibilidade térmica, oferece resistência elevada à transferência de calor e dificulta assim a sua mudança de fase e consequente armazenamento de energia.

### 3.2 Velocidade de escoamento do FTC

Na Figura 19 apresenta-se os resultados da análise da variação da velocidade do fluxo de fluido. Tal como se pode verificar na Figura, a velocidade do fluido possui pouca influência na capacidade do sistema entre 0.3 e 1.5 m/s. Velocidades acima deste intervalo são impraticáveis pois exigem caudais muito elevados, aumentando também o risco de ocorrência de ruído no sistema.

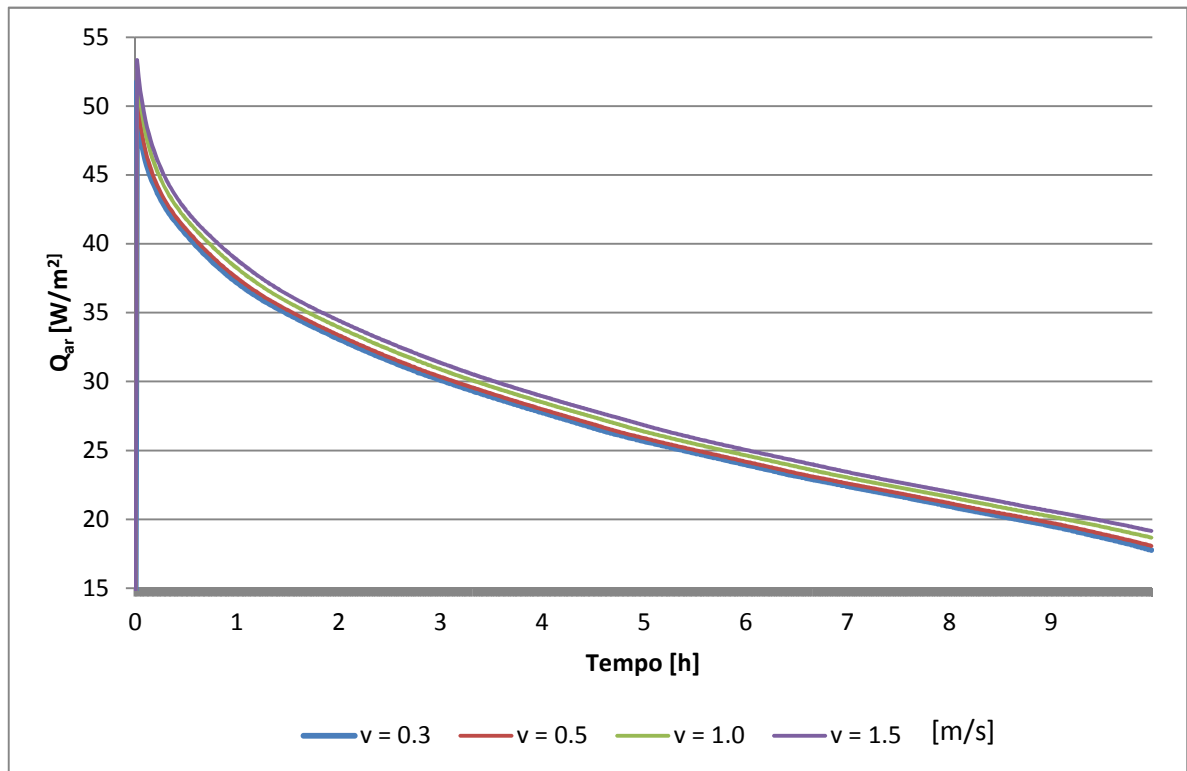


Figura 19 – Capacidade de arrefecimento do sistema para diferentes velocidades do fluido

A velocidade de escoamento do fluido de transferência de calor é um parâmetro importante neste sistema devido à sua configuração complexa. A inclusão dos encapsulamentos de PCM no interior do tubo de aço inox cria uma barreira ao escoamento que origina perdas de carga e possivelmente ruído. Apesar de neste trabalho se ter negligenciado essas questões, concentrando-se apenas na análise térmica do sistema, após se verificar que a velocidade do escoamento é pouco influente na capacidade térmica do sistema optou-se por utilizar a velocidade mais baixa de 0,3 m/s visto este se apresentar como o melhor caso para minimizar o ruído e perda de carga.

### 3.3 Temperatura de mudança de fase do PCM

Os resultados do estudo de diferentes temperaturas de mudança de fase indicam que a utilização do PCM com temperatura de mudança de fase aos 21 °C obtém uma capacidade de arrefecimento superior. Contudo uma análise relativa ao tempo necessário para recuperar a capacidade de arrefecimento do PCM, solidificando-o, indica que enquanto no caso do PCM com temperatura de mudança de fase 23 °C apenas são necessárias 4 horas e meia, para o caso do PCM com mudança de fase a 21 °C são necessárias 9 horas. Estes resultados indicam que há um lado positivo e um lado negativo na utilização de cada um dos PCMs. Um estudo mais aprofundado da influência deste parâmetro é realizado posteriormente, através da análise do conforto térmico e consumos energéticos.

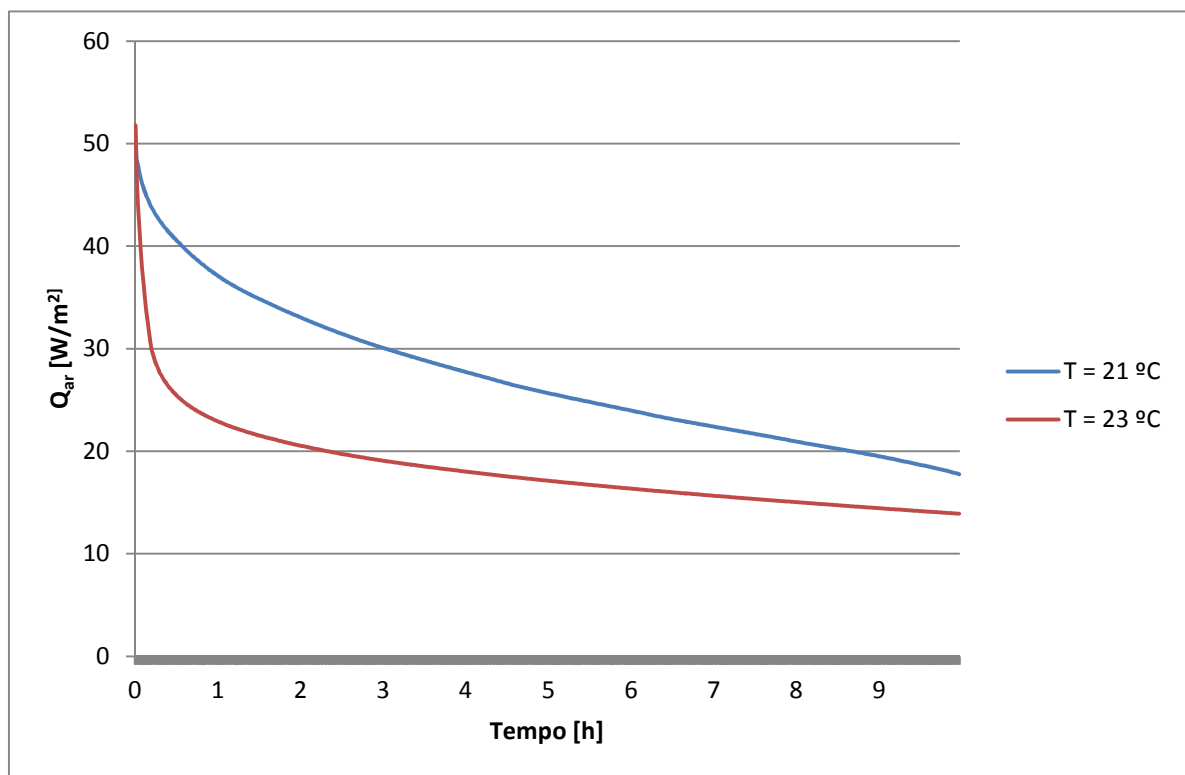


Figura 20 – Capacidade de arrefecimento do sistema para as diferentes temperaturas de mudança de fase

## **4 Simulação Energética do Sistema**

### **4.1 Breve Descrição do EnergyPlus**

O EnergyPlus é um programa de simulação energética para edifícios desenvolvido pelo departamento de energia dos Estados Unidos (DOE). O programa começou a ser desenvolvido em 1996 tendo como base os softwares de simulação DOE-2 e BLAST. O objectivo do DOE era combinar os recursos, equipas e capacidades de ambos os programas num só.

Embora seja baseado nas capacidades e recursos dos seus antecessores, o EnergyPlus é um programa completamente novo apresentando uma estrutura modular escrita em código Fortran 90. A estrutura modular facilita o desenvolvimento do programa e a participação da comunidade ao permitir que sejam adicionadas novas funcionalidades, através de novos módulos, sem ser necessário alterar o código base do programa.

Na criação do EnergyPlus houve ainda uma preocupação em corrigir as falhas dos programas anteriores. O principal defeito apresentado pelo DOE-2 e o BLAST era a simulação sequencial dos dispositivos de AVAC e cargas térmicas da qual resultava uma previsão da temperatura do espaço incorrecta por não haver feedback entre os dois grupos [42]. Na concepção do EnergyPlus considerou-se como aspecto fundamental o desenvolvimento da simulação integrada entre o módulo de AVAC e o cálculo das cargas térmicas.

A Figura 21 mostra um esquema da estrutura geral do EnergyPlus. O programa tem três componentes principais: um gestor da simulação (Simulation Manager), um módulo para simular balanço de energia e massa no espaço (Heat and Mass Balance Simulation Module) e um módulo para simular o comportamento dos sistemas (Building Systems Simulation Module). O Building Systems Simulation foi introduzido pela primeira vez no EnergyPlus e é responsável por estabelecer a comunicação entre o cálculo do balanço térmico e os vários componentes do sistema simulado. Para além desta função, este módulo também é responsável pela interacção entre o EnergyPlus e programas externos como o TRNSYS e o SPARK.

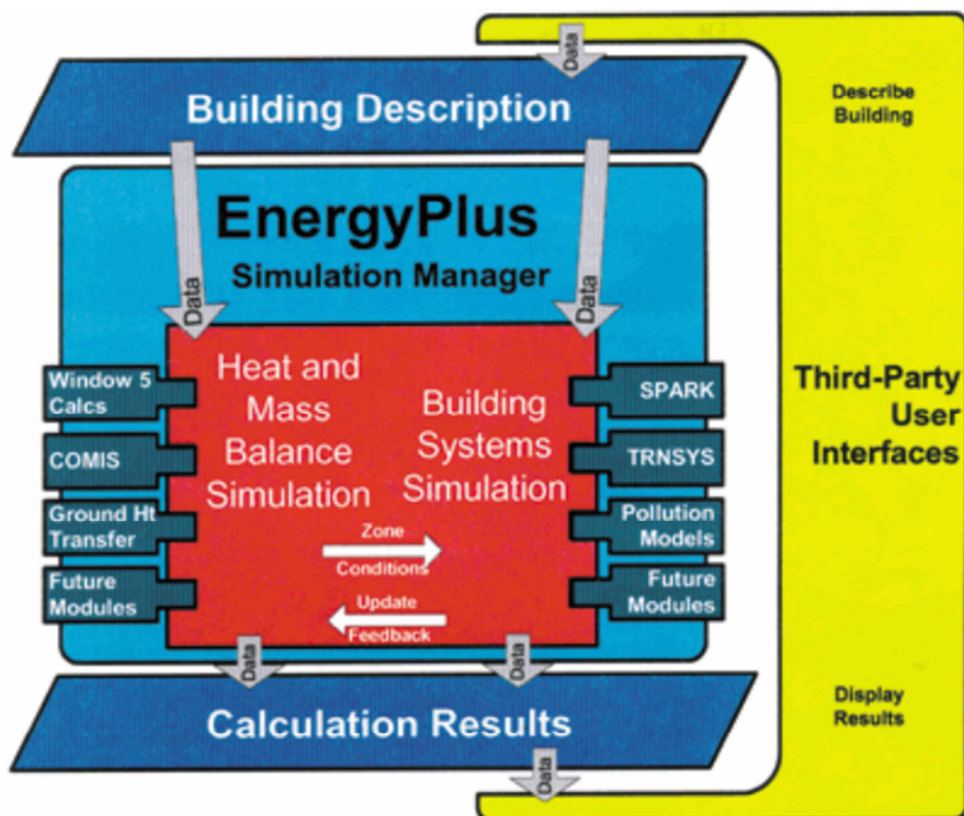


Figura 21 - Estrutura geral do programa EnergyPlus

O desenvolvimento do EnergyPlus tem como objectivo principal a progressão das capacidades de simulação do software, isto é, tornar o processo de simulação mais rápido e mais completo. Por essa razão não há uma preocupação em criar um interface pensado para o utilizador. Contudo é permitido a terceiros desenvolver interfaces e ferramentas para expandir o programa. *Simergy*, *CYPE CAD MEP*, *DesignBuilder*, *EFEN*, *Hevacomp*, *MC4 Suite*, *SMART ENERGY*, *EPlusInterface*, *COMFEN*, *Solar Shoe Box*, e *N++*, são alguns exemplos de programas que oferecem um interface entre o EnergyPlus e o utilizador [43].

## 4.2 Edifício modelo

O EnergyPlus é um programa de simulação energética para edifícios por isso para testar um sistema é necessário criar um edifício modelo onde se possa inserir o mesmo. O edifício modelo foi concebido de forma a assemelhar-se ao tipo de edifícios, referidos no capítulo 2, para os quais foi projectado o sistema estudado: edifícios com baixa inércia térmica, bom isolamento térmico e elevados ganhos internos (maioritariamente necessidades de arrefecimento).

O edifício modelo foi construído no software Google SketchUp recorrendo ao plug-in OpenStudio. Este plug-in permite converter os desenhos feitos no SketchUp num ficheiro de

input para o EnergyPlus disponibilizando dessa forma um interface gráfico que torna mais prática a introdução das características geométricas do edifício no programa de simulação.

#### 4.2.1 Características da Envolvente

Considerou-se que o espaço a ser modelado e usado como caso de estudo tem características de um escritório “open space” localizado no topo de um edifício com frentes viradas a Sul e Este. As paredes Norte e Oeste e o pavimento estão em contacto com o resto do edifício e por essa razão são definidos como superfícies adiabáticas no programa.

O espaço, de formato rectangular, tem dimensões 10 x 8 x 3 m correspondendo a maior dimensão às fachadas Sul e Norte. A Figura 22 mostra o desenho do espaço construído no SketchUp e na Figura 23 pode-se observar as vistas das fachadas Sul e Este.

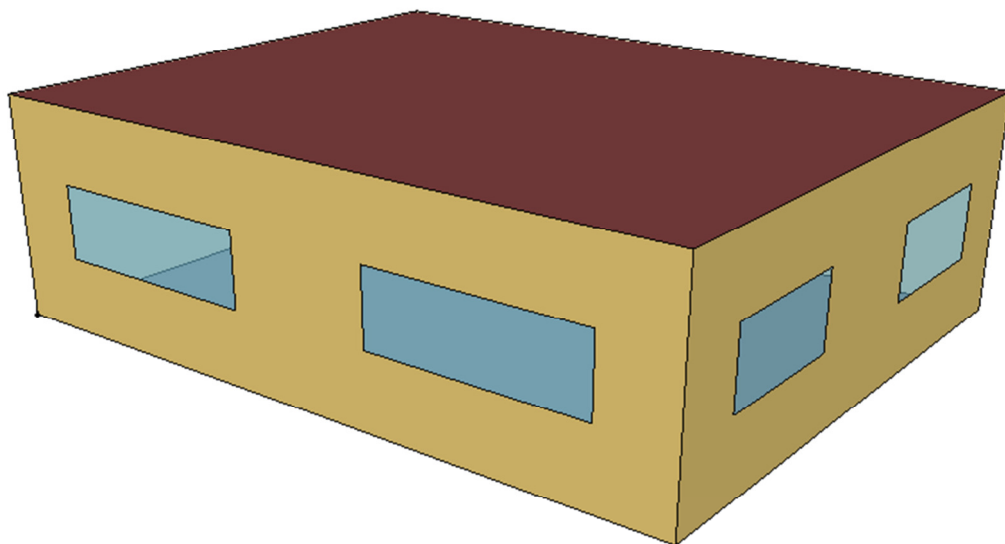


Figura 22 – Vista isométrica da casa modelo desenhado no Google SketchUp

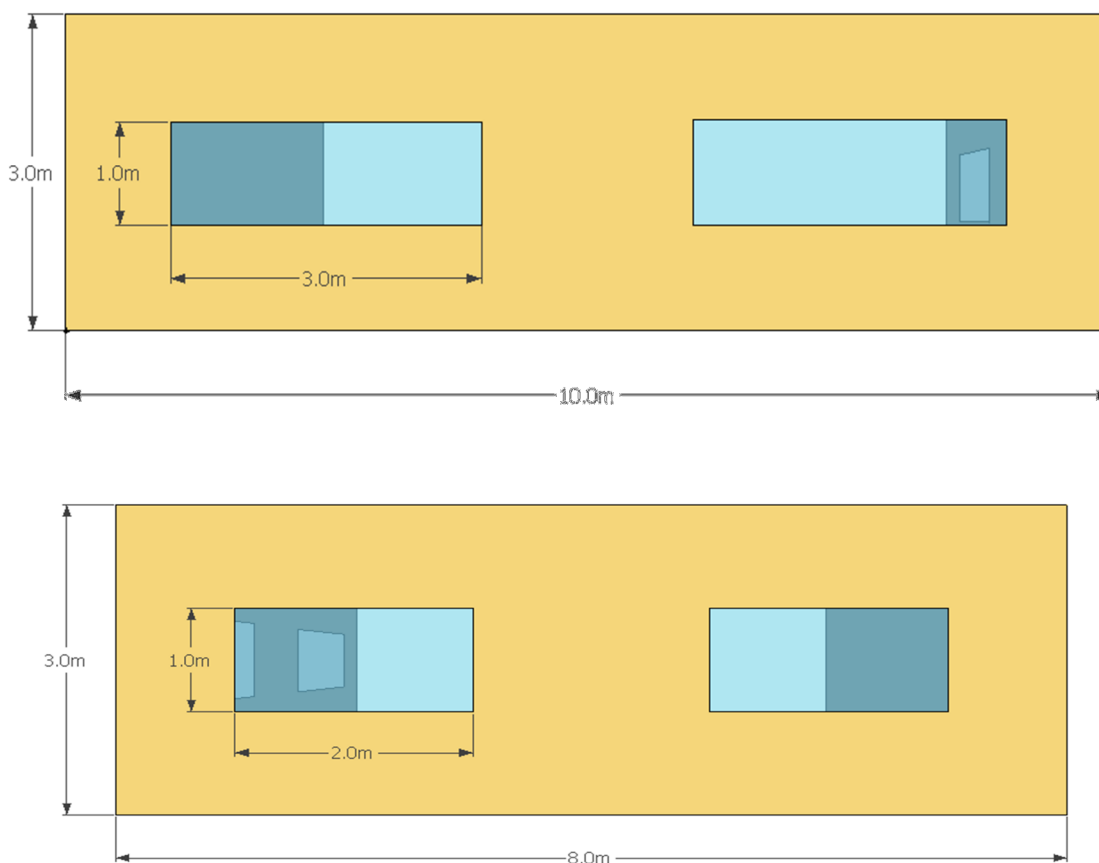


Figura 23 - Vistas das fachadas Sul(em cima) e Este(em baixo) da casa modelo

No EnergyPlus os elementos da envolvente opaca são definidos em três etapas. Inicialmente estabelece-se todos os materiais usados na construção incluindo as suas propriedades (condutibilidade térmica, calor específico e densidade) e a sua espessura. Em seguida na secção “Construções” agrupa-se os materiais de acordo com a composição que se pretende. Por fim para cada elemento da envolvente define-se a construção que o compõe. Neste modelo utiliza-se, para todos os elementos da envolvente opaca, uma construção de baixa inércia [44] composta pelos materiais descritos na Tabela 6. O coeficiente de transmissão térmica da envolvente é dado por (22).

Tabela 6 - Características da envelope da casa modelo, construção de baixa inércia [44]

Material	Espessura [m]	Condutibilidade Térmica [W/mK]	Calor Especifico [J/kgK]	Densidade [kg/m3]
Reboco	0,016	0,22	1060	750
Lã Mineral	0,05	0,045	1000	125
Lâmina de PE	0,001	0,35	1470	900
Lã Mineral	0,25	0,045	1000	125
Placa de Madeira	0,02	0,13	1700	650
Poliestireno Extrudido	0,09	0,035	1270	30
Gesso	0,01	0,99	790	2000



$$U_{ENVOLVENTE} = 0,11 [W/(m^2.K)] \quad (22)$$

Existem dois vãos envidraçados nas paredes Sul e Este. Na parede Sul as suas dimensões são 3 x 1 m enquanto na parede Este são 2 x 1 m. Os envidraçados são compostos por um vidro duplo com uma espessura de lâmina de ar de 16 mm, com corte térmico e um dispositivo de oclusão nocturna com permeabilidade baixa. Para um vão envidraçado com estas características o valor do coeficiente de transmissão térmica (23) é dado pelo ITE 50 [45].

$$U_{ENVIDRAÇADOS} = 2,5 [W/(m^2.K)] \quad (23)$$

Para além do coeficiente de transmissão térmica, no EnergyPlus também é necessário o Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) para simular o comportamento dos vãos envidraçados. O SHGC estabelece a relação entre o ganho total de calor solar e a radiação solar incidente no vão envidraçado. O ganho total de calor inclui a radiação solar transmitida directamente e a porção de absorção da radiação solar, que é então irradiada, conduzida, ou transmitida por convecção para dentro do espaço [46]. Sendo esta propriedade um rácio, o seu valor varia entre 0 e 1 e neste estudo optou-se por usar o valor médio, SHGC = 0,5.

#### 4.2.2 Condições de funcionamento

Antes que se possa simular o balanço energético de um edifício é preciso determinar as condições de funcionamento, isto é, determinar a taxa de ventilação, os ganhos internos e as condições climáticas que afectam o seu comportamento.

Relativamente à renovação de ar novo, o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) [47] determina caudais mínimos de ar novo consoante a utilização do edifício. Dos diversos tipos de actividades apresentados o que mais se adequa ao edifício descrito neste trabalho é a utilização para gabinetes de serviços. Para esse caso os caudais mínimos são de 35 m<sup>3</sup>/h por ocupante ou 5 m<sup>3</sup>/h por m<sup>2</sup>. Como neste caso não se encontra definido o número de ocupantes no espaço utilizou-se o caudal por m<sup>2</sup> e tendo em conta a área de 80 m<sup>2</sup> do espaço o caudal total de ar novo é 400 m<sup>3</sup>/h. Na Figura 24 encontra-se um perfil de ocupação retirado do RCCTE [48] aplicado ao caudal total de ar novo.

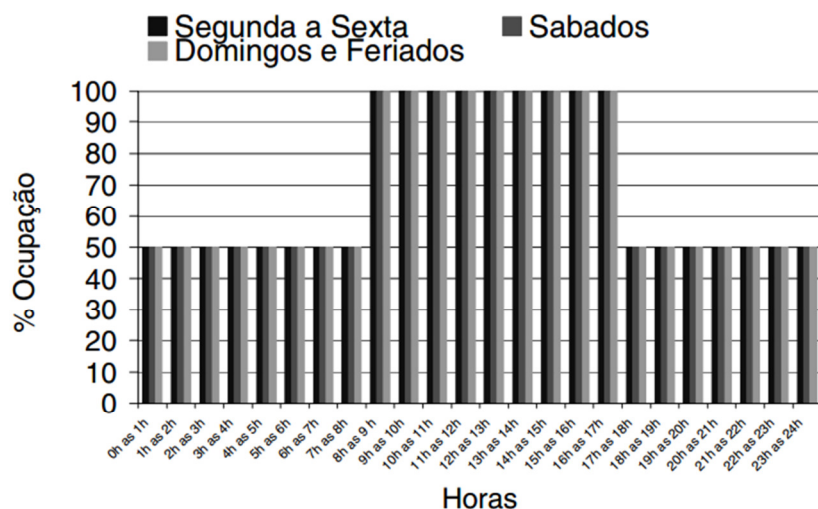


Figura 24 - Perfil da taxa de ocupação [48]

No que respeita aos ganhos internos, no ASHRAE Handbook of Fundamentals[49] é apresentado um estudo que determina valores padrão para ganhos internos em edifícios de serviços. O estudo determinou uma escala com quatro níveis consoante a densidade de utilização do espaço. Como foi referido anteriormente, neste trabalho consideramos que o edifício apresenta uma elevada carga de ganhos internos e por essa razão utilizou-se o valor mais pesado,  $21,5 \text{ W/m}^2$ , apresentado no ASHRAE Handbook of Fundamentals. Na Figura 25 é apresentada a taxa de utilização aplicada aos ganhos internos.

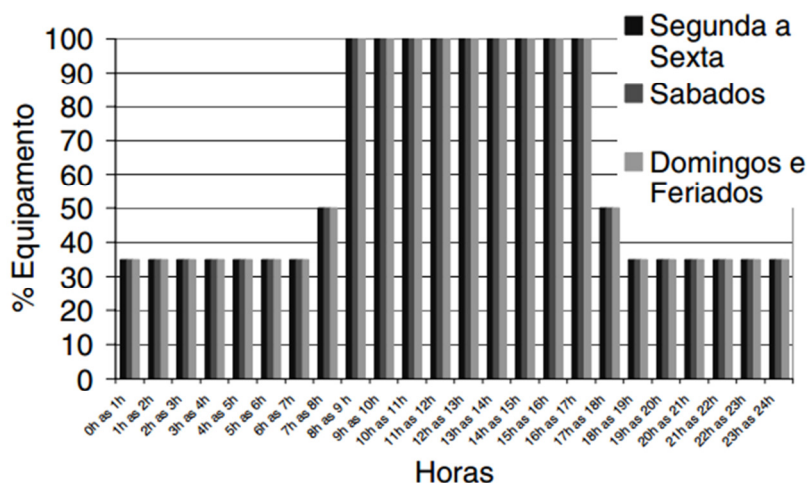


Figura 25 - Taxa de utilização para equipamentos [48]

Relativamente às condições climáticas, o EnergyPlus usa um tipo de ficheiros específicos que podem ser obtidos para mais de 2100 locais no sítio do EnergyPlus [50]. Neste estudo foi utilizado o ficheiro de dados climáticos para a cidade do Porto, Portugal.

### 4.2.3 Necessidades Térmicas do Espaço

Uma vez definidas as condições de funcionamento do espaço a climatizar é possível obter as necessidades térmicas desse espaço. Tendo em conta que o sistema em estudo é projectado para responder às necessidades de arrefecimento escolheu-se para período de estudo os meses mais quentes do ano, começando dia 1 de Junho e terminando dia 31 de Agosto.

Para se definir as necessidades térmicas do espaço é necessário saber as condições limites de conforto que determinam o intervalo de temperaturas a que deve ser mantido o espaço. O EnergyPlus contém rotinas que permitem fazer uma análise dos níveis de conforto térmico. Estas rotinas utilizam para fazer essa verificação a norma 55-2004 da ASHRAE[51]. Para facilitar o uso do programa de simulação e dos dados por ele obtidos foram utilizados os mesmos critérios para a análise do conforto térmico neste estudo. Na Figura 26 encontra-se um gráfico representativo do intervalo de conforto para as condições de Verão segundo a norma ASHRAE 55-2004.

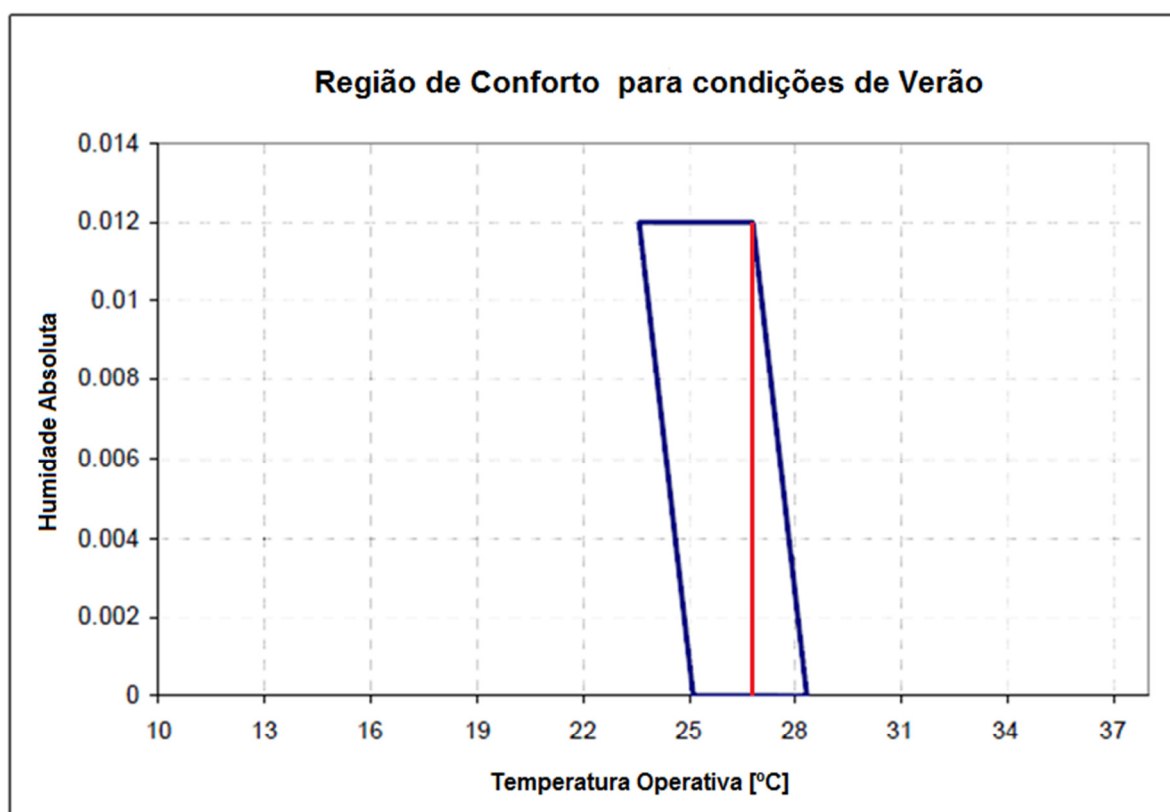


Figura 26 - Intervalo de conforto térmico para as condições de Verão segundo a norma ASHRAE 55-2004

O sistema PCM é um sistema projectado como sistema de arrefecimento e por essa razão neste estudo apenas existe preocupação com o limite máximo de temperatura do espaço. Para o caso de Verão verifica-se pela linha vermelha definida na Figura 26 que caso a temperatura não exceda os 26 °C existe conforto térmico independentemente da humidade.

Na Figura 27 encontra-se representada a carga térmica de arrefecimento necessária para manter o espaço a uma temperatura inferior a 26 °C. O valor máximo da carga térmica ocorre dia 10 de Agosto às 16 horas sendo o seu valor de 5239 W.

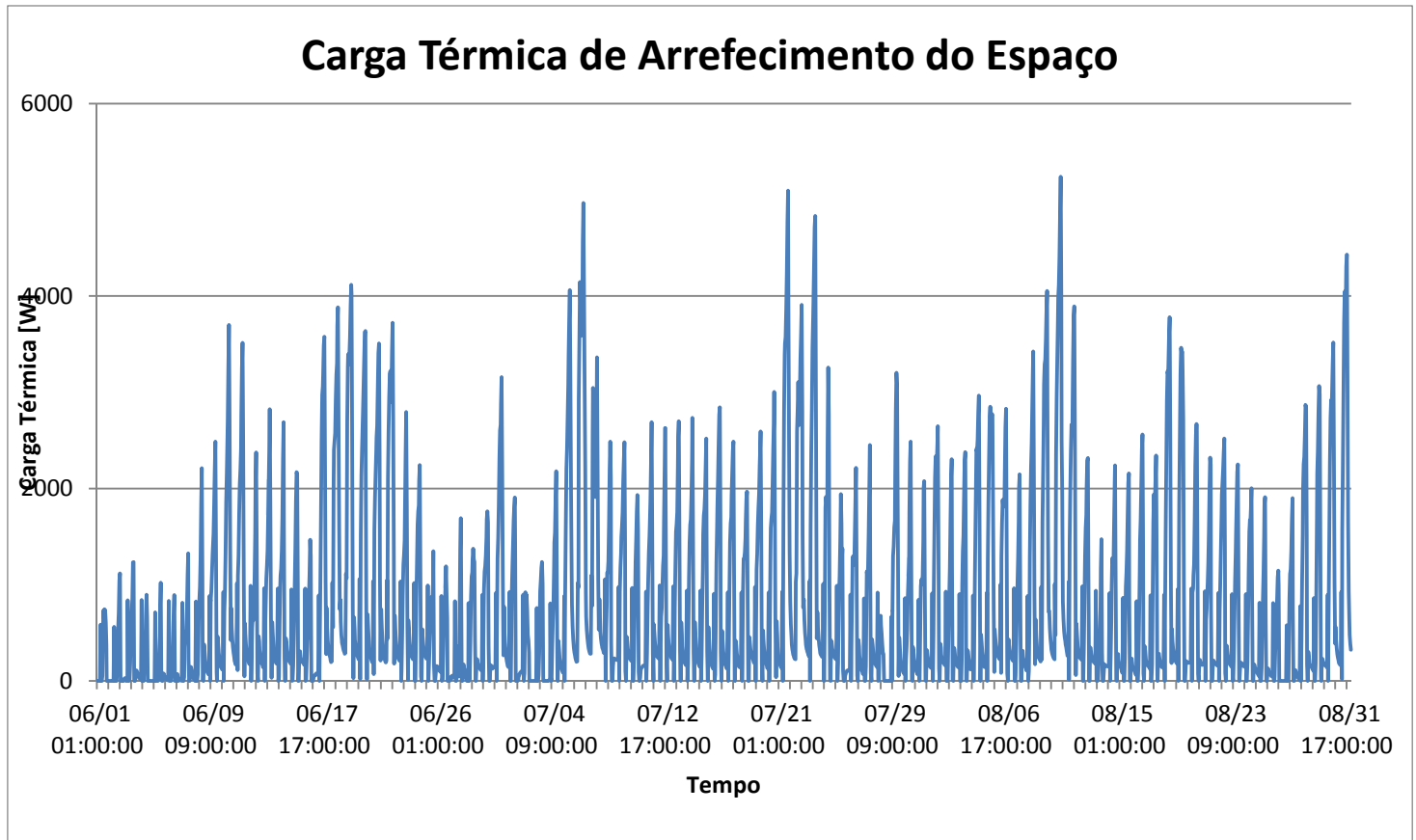


Figura 27 - Variação da carga térmica de arrefecimento no espaço a climatizar

Na Figura 28 encontra-se representada a variação da temperatura no espaço quando este se encontra em regime free-floating, isto é, quando se retira o controlo das condições térmicas e se permite que a temperatura oscile naturalmente. Verifica-se a ocorrência de temperaturas próximas dos 40 °C.

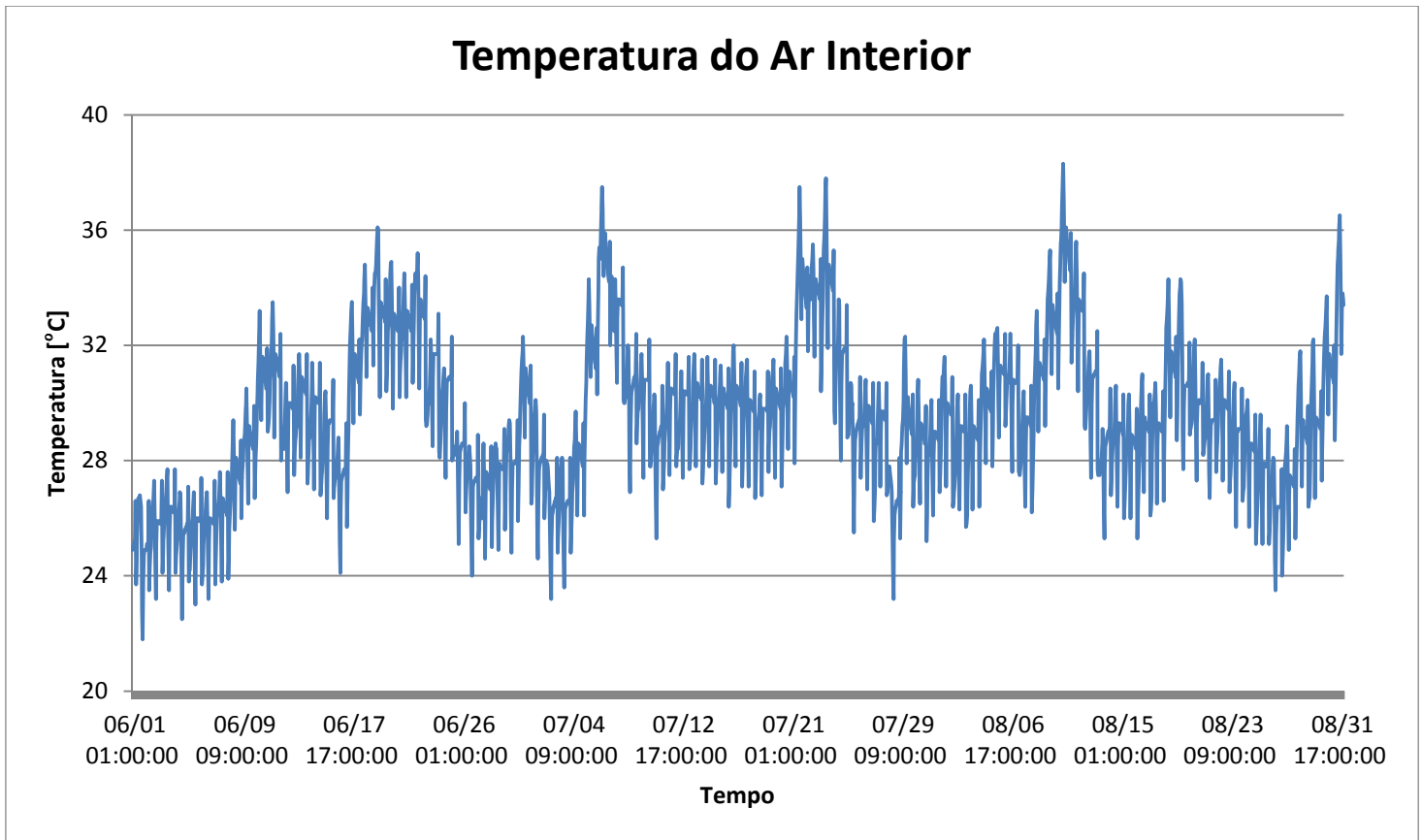


Figura 28 - Variação da temperatura no espaço a climatizar, em regime free-floating

Uma vez calculada a necessidade térmica do espaço é possível dimensionar o sistema recorrendo às equações definidas na secção 2.3. Para um sistema com configuração de placa pequena, configuração que se verificou a mais eficiente na análise paramétrica, o comprimento do sistema é de 260 m.

### 4.3 Implementação do sistema PCM no EnergyPlus

Os responsáveis pelo programa de simulação EnergyPlus estabeleceram um conjunto de normas que devem ser seguidas quando se desenvolve um novo módulo para ser inserido no mesmo. Estas normas têm como objectivo facilitar a construção do módulo e também criar uma estrutura homogénea para todo o programa de forma a permitir uma compreensão fácil a todos os contribuidores e que cada um possa acrescentar novas funcionalidades a módulos já existentes. Para o desenvolvimento do módulo para simular o sistema PCM tentou-se seguir as normas estabelecidas pela equipa do EnergyPlus sempre que possível.

Para a inclusão de um novo componente de HVAC no programa, caso pretendido neste trabalho, é proposta a utilização duma estrutura composta pelas seguintes subrotinas:

- Subrotina *Sim*

Esta é a única subrotina pública do módulo. Ela é chamada quando o programa recebe informação de que existe um sistema deste tipo e é responsável por chamar as restantes subrotinas do módulo que fazem o trabalho de simulação.

- Subrotina *Get*

Esta subrotina é utilizada para obter os dados de input necessários para simular o sistema e coloca-os nas respectivas variáveis.

- Subrotina *Init*

Os cálculos de inicialização necessários nos diversos pontos da simulação são realizados nesta subrotina. Também nesta subrotina são transferidas para variáveis locais os dados guardados nos nós do programa.

- Subrotina *Size*

Nos casos em que haja a possibilidade do sistema ser dimensionado pelo próprio programa esse dimensionamento é feito nesta subrotina.

- Subrotina *Calc*

Esta subrotina é responsável por fazer os cálculos necessários para simular a performance do sistema.

- Subrotina *Update*

Após efectuados os cálculos para simular o sistema, esta subrotina é utilizada para guardar os resultados nos nós de saída do componente.

- Subrotina *Report*

Quando são necessários cálculos especiais para apresentar os resultados eles são feitos nesta subrotina.

Uma vez definida a estrutura do módulo é necessário saber em que parte da estrutura do EnergyPlus este vai ser chamado. Em baixo encontra-se representada a árvore de chamamento principal do programa. No topo da árvore encontram-se as rotinas ProcessInput e ManageSimulation que controlam todo o processo de simulação.

- ProcessInput (módulo InputProcessor)
- ManageSimulation (módulo SimulationManager)
  - ManageWeather (módulo WeatherManager)
  - ManageHeatBalance (módulo HeatBalanceManager)
    - ManageSurfaceHeatBalance (módulo HeatBalanceSurfaceManager)
    - ManageAirHeatBalance (módulo HeatBalanceAirManager)
      - CalcHeatBalanceAir (módulo HeatBalanceAirManager)
        - ManageHVAC (módulo HVACManager)

Para este trabalho, tendo em conta que o sistema em estudo é um componente de HVAC tem especial interesse olhar em pormenor para a árvore de chamamento relativa ao módulo HVACManager que se encontra em baixo. Verifica-se que existem diferentes módulos para simular diferentes tipos de equipamento. O sistema em estudo encontra-se no grupo *ZoneEquipment* e a subrotina *SimPCM* que serve como motor da simulação do sistema é chamada no módulo *ZoneEquipmentManager*.

- SimHVAC (módulo HVACManager)
  - ManageSetPoints (módulo SetPointManager)
  - SimSelectedEquipment (módulo HVACManager)
    - ManageAirLoops (módulo SimAirServingZones)
    - ManageElectricLoadCenters (módulo ElectricPowerManager)
    - ManagePlantLoops (módulo PlantManager)
    - ManageZoneEquipment (módulo ZoneEquipmentManager)
      - ***SimPCM*** (módulo HVACSistemaPCM)

Após se definir a localização do módulo do sistema na estrutura do programa, para que este seja construído é necessário determinar as informações necessárias para simular o sistema. Os dados necessários para a simulação do sistema PCM têm duas origens diferentes, uma parte dos dados são introduzidos pelo utilizador enquanto outra parte são dados intrínsecos do programa. Na Tabela 7 apresentam-se as variáveis de entrada e saída do sistema. No EnergyPlus os dados são introduzidos pelo utilizador num ficheiro em formato ASCII.

Tabela 7 - variáveis de entrada e saída do módulo que simula o Sistema com PCM

Input Externo	Input Interno	Output
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Horário do modo Recarga;</li> <li>- Propriedades do PCM;</li> <li>- Comprimento do sistema;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura do espaço;</li> <li>- Temperatura de saída do fluido no instante anterior;</li> <li>- Temperatura de saída do chiller (modo Recarga);</li> <li>- Temperatura do PCM no instante anterior;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Carga térmica removida do espaço;</li> <li>- Temperatura de saída do fluido;</li> <li>- Temperatura do PCM;</li> </ul>

Na Figura 29 apresenta-se um fluxograma que representa a estrutura do módulo responsável por simular o comportamento do sistema PCM. O programa começa por ler os dados de Input e aloca-os nas respectivas variáveis. Na estrutura mencionada anteriormente este processo corresponde à sub-rotina *Get*. Uma das variáveis de Input é o horário do processo de Recarga do PCM. Este valor é alocado na variável *onoff* que é uma variável binária. O valor dessa variável depende do período do dia e assume o valor 1 quando o sistema se encontra em modo recarga e valor 0 quando o sistema se encontra em modo passivo. Consoante o modo de funcionamento o programa estabelece a temperatura de entrada do fluido como sendo igual à temperatura de saída no instante anterior, caso esteja em modo de descarga, ou igual à temperatura programada para a recuperação do PCM, modo de recarga. Em seguida o programa faz a verificação de uma condição que define se o sistema está activo ou não. No caso do modo descarga essa condição é relativa à temperatura do espaço, caso a temperatura do espaço seja superior à temperatura definida como setpoint o sistema está activo. No modo recarga o sistema encontra-se activo enquanto a temperatura de saída do fluido for mais que 0,1 °C superior à temperatura de entrada. Esta diferença de temperatura foi obtida através da simulação de forma a corresponder ao PCM estar totalmente solidificado. Quando o sistema se encontra activo é chamada a subrotina *Gauss\_Solve* que é responsável por resolver o sistema de equações. Visto o modelo matemático se traduzir por um sistema de equações lineares com um número reduzido de equações optou-se por utilizar o método de eliminação de Gauss dada a sua simplicidade e facilidade de execução.



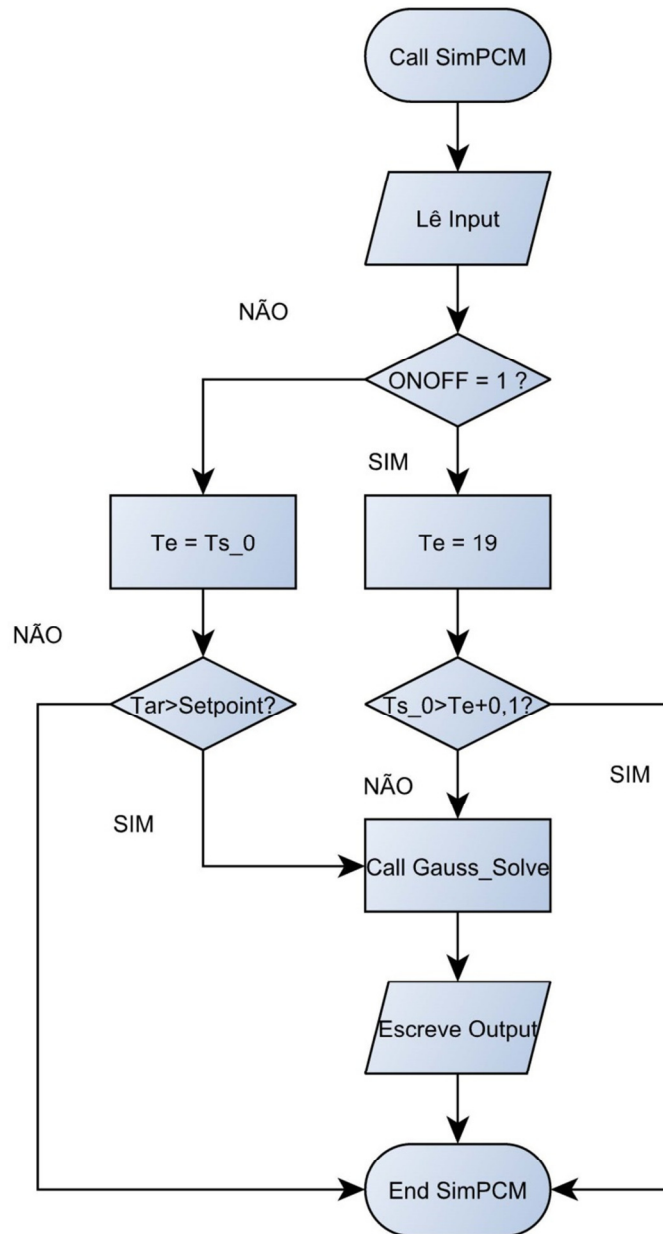


Figura 29 - Fluxograma que representa a estrutura do módulo que simula o sistema PCM

Um problema que surge na introdução do modelo matemático no EnergyPlus é a obtenção dos coeficientes de transferência de calor. Ao contrário do EES que contém uma biblioteca de correlações de transferência de calor e permite dessa forma obter os coeficientes e integrá-los directamente nas equações, o EnergyPlus não apresenta essa funcionalidade. Contudo tendo em conta que as temperaturas dos fluidos no sistema não sofrem grandes variações é possível estabelecer funções que relacionam os coeficientes de transferência de calor com as temperaturas do fluido e do ar no espaço. Recorrendo ao EES para obter os valores dos coeficientes de calor para várias temperaturas e utilizando o Microsoft Excel obtiveram-se as equações (24) e (25) que representam respectivamente os coeficientes de convecção entre o tubo e o ar e entre o fluido e o tubo.

$$h_{ar} = 7 \cdot 10^{-4} \cdot (T_{ar} - T_f)^4 + 1,9 \cdot 10^{-3} \cdot (T_{ar} - T_f)^3 - 2,1 \cdot 10^{-2} \cdot (T_{ar} - T_f)^2 + 1,6 \cdot (T_{ar} - T_f) + 4,1 \quad (24)$$

$$h_f = 5 \cdot 10^{-2} \cdot T_f^2 + 13,8 \cdot T_f + 571 \quad (25)$$

Uma vez estabelecido o módulo do sistema é possível simular os seus consumos energéticos sendo para isso necessário criar-se uma rede de AVAC que estabeleça a conexão entre os vários componentes que nele intervêm. As redes de AVAC no EnergyPlus dividem-se em três circuitos que são compostos por ramos, conectores e nós. Um ramo engloba os vários componentes situados ao longo de um tubo ou uma conduta, os conectores estabelecem a ligação entre três ou mais ramos e os nós servem para conectar os diversos componentes dentro de um ramo. Os dois circuitos principais que constituem uma rede de AVAC são o circuito do equipamento de zona e o circuito do equipamento de aquecimento e refrigeração. O circuito do equipamento de zona contém o equipamento responsável pela climatização do espaço, lado das necessidades (*Demand Side*), caso do sistema PCM na rede deste trabalho. O circuito do equipamento de aquecimento e refrigeração contém o equipamento responsável pelo aquecimento e/ou arrefecimento dos fluidos de transferência de calor que circulam na rede, lado da alimentação (*Supply Side*), caso do chiller na rede deste trabalho. O terceiro circuito é utilizado para simular Condensadores como por exemplo uma torre de arrefecimento e não é necessário para a simulação da rede deste trabalho.

Na Figura 30 encontra-se representada a rede de AVAC concebida para simular o sistema PCM. O nó 1 representa o espaço e contém a informação relativamente às suas propriedades, incluído a temperatura do ar. O nó 10 constitui o condensador do chiller e neste caso é simulado como ar exterior.

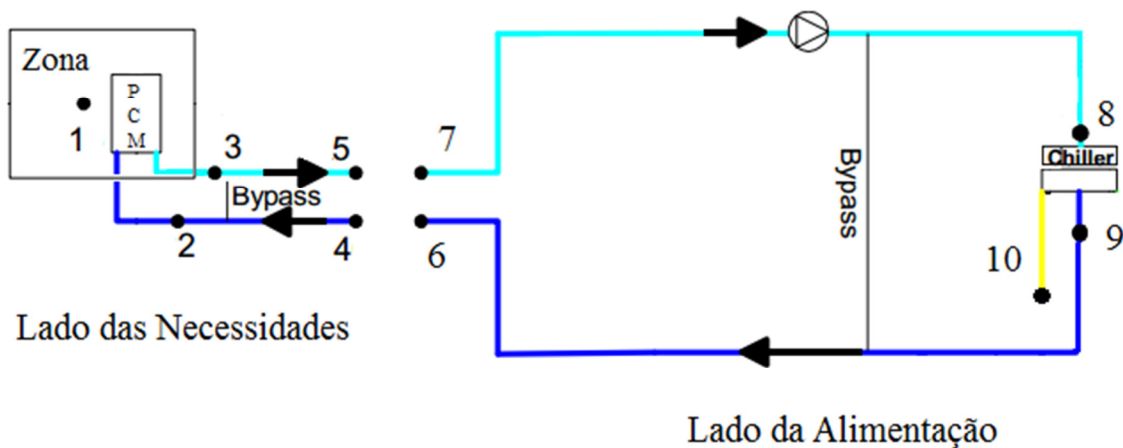


Figura 30 - Diagrama de AVAC para o sistema PCM simulado no EnergyPlus

Para simular o funcionamento do chiller foi utilizado o módulo *PlantEIRChillers*. A performance do equipamento é calculada recorrendo ao mesmo método que era aplicado no DOE-2 [52], através de três curvas que avaliam a eficiência do chiller relativamente a diferentes parâmetros. Essas curvas são:

- *CAPFT – Chiller Capacity as a Function of Temperature*

Esta curva define a variação da capacidade de arrefecimento do chiller em função das temperaturas de saída do evaporador e de entrada no condensador.

- *EIRFT – Energy Input Ratio as a Function of Temperature*

Esta curva define a variação da eficiência do chiller segundo o parâmetro EIR em função das temperaturas de saída do evaporador e de entrada no condensador.

- *EIRFPLR – Energy Input Ratio as a Function of Part Load Ratio*

Esta curva define a variação da eficiência do chiller em função da fracção da capacidade total de arrefecimento que está a ser utilizada.

Para além destas três curvas é ainda necessário fornecer ao programa a capacidade de arrefecimento e o COP do chiller para as condições de referência (temperatura de saída da água, temperatura à entrada do condensador). Neste trabalho utilizou-se como modelo para o chiller o equipamento com a referência EBHQ-BV3 da empresa Daikin. Na Tabela 8 apresenta-se as características do equipamento.

Tabela 8 - Características referência do chiller

Capacidade Arrefecimento Referência [kW]	5,12
COP Referência	3,11

No anexo C colocou-se as tabelas fornecidas pela Daikin relativamente à performance do chiller e que foram usadas para obter as equações necessárias para a simulação do mesmo.

#### **4.4 Validação Numérica**

De forma a afirmar que o resultado de uma solução numérica é totalmente coerente com a realidade, deve-se assegurar que:

- a. O modelo matemático reflecte todos os aspectos do mundo real;
- b. O método numérico resolve exactamente as equações do modelo matemático;

A verificação da precisão com que um modelo computacional reflecte os aspectos do mundo real é usualmente executada recorrendo à comparação dos resultados com valores experimentais. Os modelos experimentais permitem analisar as condicionantes introduzidas pela implementação prática e dessa forma representam a resposta real do sistema. Quando correctamente obtidos os valores experimentais servem como referência para analisar a precisão de um modelo computacional.

Como alternativa à comparação com um modelo experimental, quando esta não é possível, é comum recorrer-se a resultados experimentais existentes na bibliografia ou utilizar modelos comprovados que sirvam de base para efectuar a validação.

Neste trabalho não foi possível construir um modelo experimental e sendo este um sistema inovador não existem estudos anteriores realizados acerca do mesmo. Contudo as simplificações utilizadas e as consequentes equações obtidas foram baseadas em previamente verificados que estudaram sistemas semelhantes artigos [31], [38].

Apesar de não ser possível assegurar o primeiro ponto da validação do sistema, efectuou-se a verificação sobre a capacidade do modelo computacional criado representar fielmente as equações definidas no modelo matemático. Essa verificação foi feita através da comparação dos resultados obtidos na simulação paramétrica realizada no EES (anexo A) e dos resultados obtidos na simulação energética no programa EnergyPlus (anexo B).

#### **Comparação EES vs EnergyPlus**

De forma a verificar se o modelo matemático é correctamente simulado pelo modelo computacional introduzido no EnergyPlus, compararam-se os resultados obtidos nesse programa com os resultados obtidos na simulação paramétrica realizada no EES.

As primeiras situações simuladas foram a variação da temperatura da água e do PCM no processo de descarga (fusão) do PCM. Para estas simulações, e tendo em conta as limitações do EES, considerou-se que a temperatura ambiente é mantida constante, considerando-se  $T = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Definiu-se também que o sistema funciona de forma passiva, a água é recirculada, Na

Figura 31 pode-se observar os resultados obtidos no EnergyPlus e no EES para a temperatura do PCM e na Figura 32 pode-se observar os resultados para a temperatura da água. É demonstrado que existe coerência entre os resultados obtidos nos dois programas verificando-se assim que o modelo matemático é correctamente simulado no EnergyPlus.

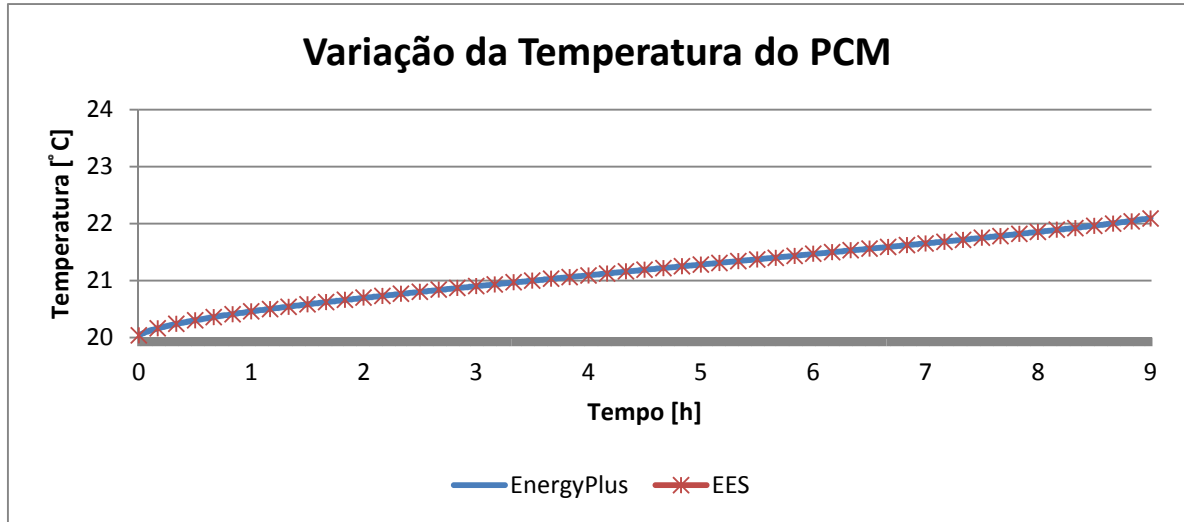


Figura 31 - Comparação dos resultados do modelo EES e do modelo EnergyPlus para a temperatura do PCM

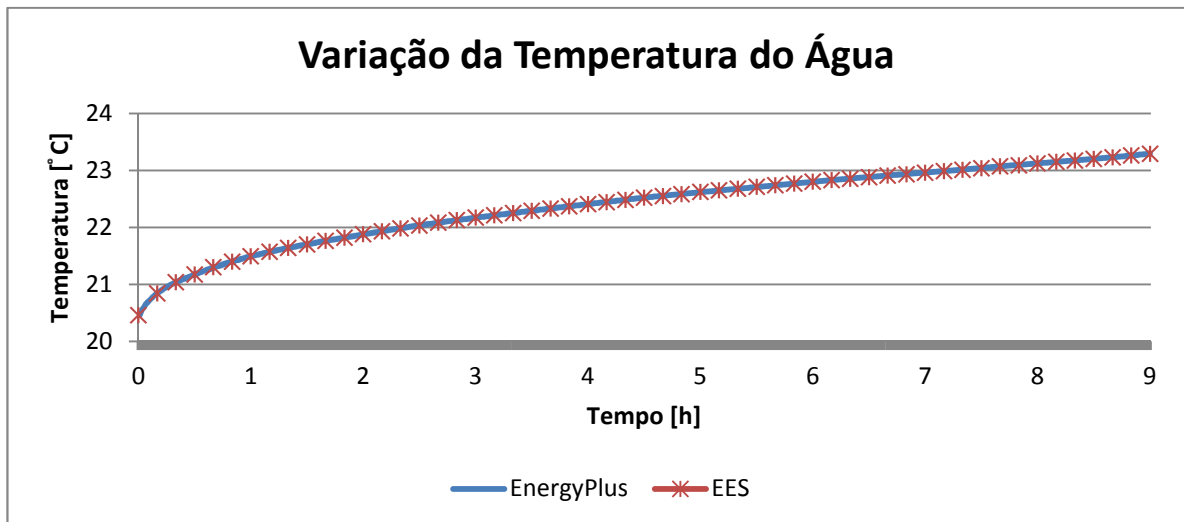


Figura 32 - Comparação dos resultados do modelo EES e do modelo EnergyPlus para a temperatura da Água

Após se comparar os dois modelos assumindo o espaço a uma temperatura constante estudou-se a capacidade de arrefecimento do sistema considerando a variação da temperatura do espaço. Analisou-se primeiro a variação da temperatura do espaço no EnergyPlus e posteriormente inseriu-se esses valores no EES. Verifica-se, na Figura 33, que os resultados apresentam apenas ligeiras diferenças mostrando coerência entre os dois modelos.

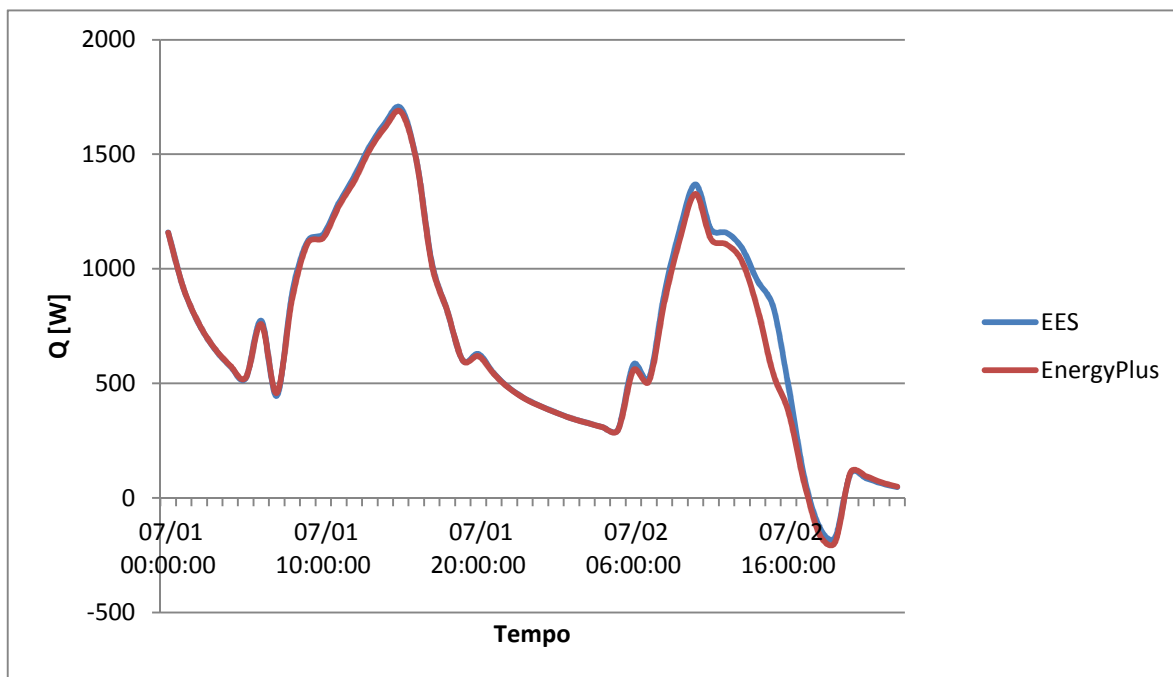


Figura 33 - Comparação dos resultados do modelo EES e do modelo EnergyPlus relativamente capacidade de arrefecimento do sistema

#### 4.5 Simulação do Sistema Convencional

Com o objectivo de se obter uma base de comparação para os resultados obtidos na simulação do sistema PCM simulou-se um sistema convencional aplicado ao mesmo espaço. O sistema escolhido é constituído por um ventilo-convector ligado a um chiller.

No EnergyPlus o ventilo-convector é definido por dois permutadores de calor, um para arrefecimento e outro para aquecimento e um ventilador para circular o ar. Sendo o objectivo a comparação com o sistema PCM que apenas funciona como sistema de arrefecimento, o permutador de aquecimento é desprezado. O ventilador pode recircular ar do espaço ou insuflar ar do exterior. Neste trabalho definiu-se que o ar era recirculado. O programa oferece ainda a possibilidade de auto dimensionar o ventilo-convector, funcionalidade que foi utilizada. Na Figura 34 apresenta-se o diagrama da rede AVAC para o sistema convencional.

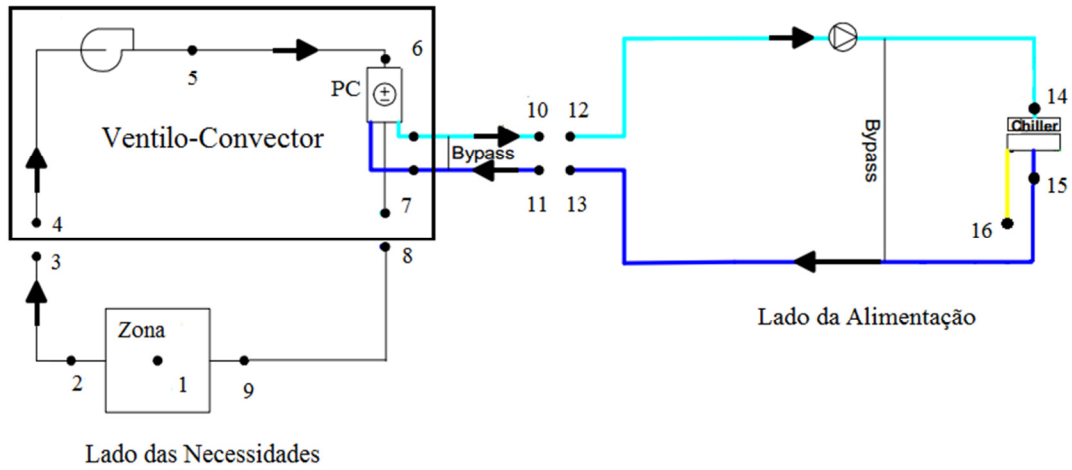


Figura 34 - Diagrama de AVAC para o sistema convencional simulado no EnergyPlus

Relativamente ao chiller, foi definido com as mesmas características do chiller utilizado para o sistema PCM.





## 5 Análise da Eficiência do Sistema

Nesta parte, utilizando as características definidas na análise paramétrica, simula-se a capacidade do sistema para responder às necessidades térmicas do espaço e manter condições de conforto recorrendo ao software de simulação energética EnergyPlus. Posteriormente é feita a comparação com um sistema convencional.

### 5.1 Sistema PCM

Na análise da capacidade do sistema PCM para manter condições de conforto térmico no espaço consideraram-se diferentes modos de funcionamento. Relativamente ao período diurno, altura em que o edifício é utilizado, simularam-se diferentes situações para o accionamento do sistema. No período nocturno, período de carga do PCM, considerou-se que o PCM era recarregado circulando água fria no sistema.

Na Tabela 9 apresentam-se os diferentes modos de funcionamento analisados na simulação e suas características.

Tabela 9 - Diferentes modos de funcionamento estudados e suas características

Modos de Funcionamento	
Climatização do Espaço (Diurno)	Carga do PCM (Nocturno)
<b>Sistema circula fluido quando:</b> - $T_{amb} > 24$ ; - $T_{amb} > 25$ ; - $T_{amb} > 26$ ;	<b>Recarga</b> - Recuperação do PCM todas as noites, durante o período de não ocupação;

Durante o período diurno, funcionamento passivo do sistema, considerou-se que apenas se inicia a circulação do fluido quando a temperatura do ar no interior do espaço ultrapassa-se

um determinado setpoint. Foram simulados três setpoints diferentes dentro do intervalo de conforto estabelecido.

Relativamente ao período de Recarga, considerou-se que este se iniciaria uma hora após o término do período de ocupação e cessaria uma hora antes do início do mesmo, ou mais cedo caso tivesse ocorrido a recuperação completa do PCM. O período de ocupação ficou definido como ocorrendo entre as sete horas da manhã e as oito horas da noite.

Definiu-se como 19 °C a temperatura da água à saída do chiller. A utilização de temperaturas mais baixas não é aconselhável devido ao risco de ocorrência de condensações no sistema.

Na primeira simulação colocou-se o sistema em funcionamento passivo estabelecendo-se como setpoint para activação do sistema uma temperatura do espaço superior a 26 °C. Na Figura 35 apresenta-se a variação da temperatura no interior do espaço durante os meses de Julho e Agosto utilizando um PCM com temperatura de mudança de fase aos 21 °C.

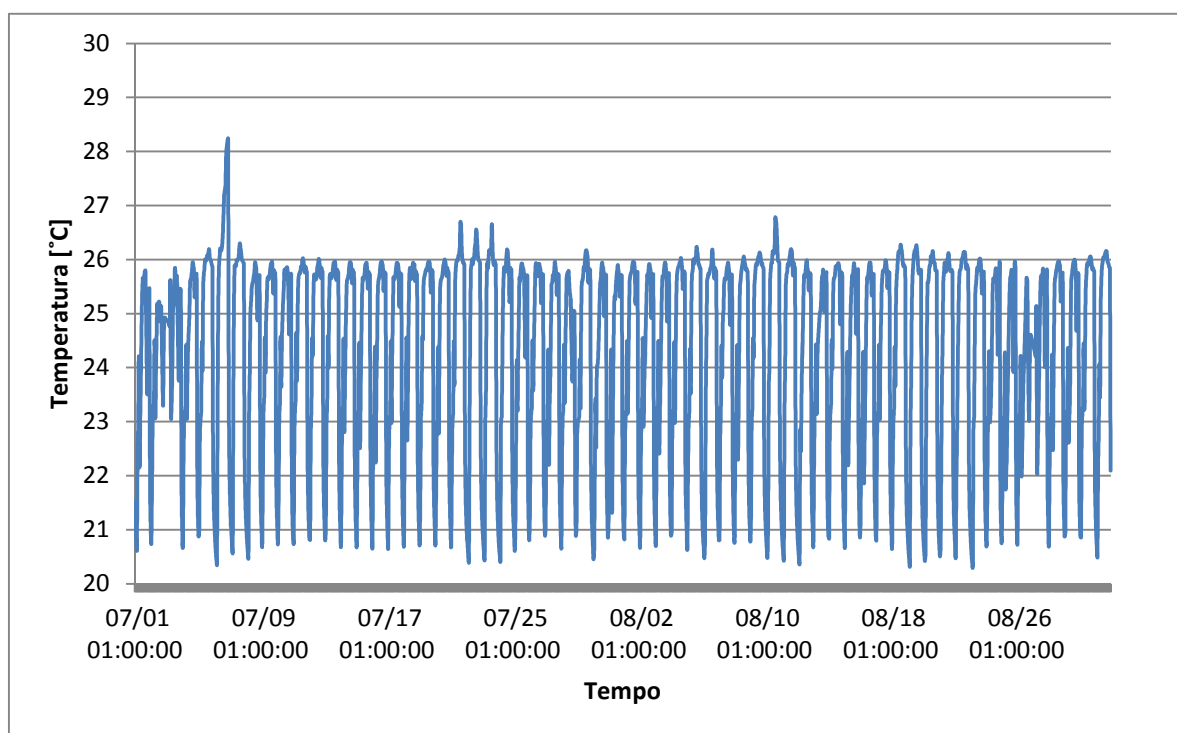


Figura 35 - Variação da temperatura do ar no interior do espaço para o funcionamento do sistema utilizando um PCM com mudança de fase aos 21 °C

Verifica-se que o sistema com setpoint 26 °C chega a atingir temperaturas próximas dos 28 °C, não tendo capacidade para responder à carga térmica do espaço e mantê-lo a uma temperatura inferior à temperatura máxima do intervalo de conforto, 26 °C, durante todo o período de simulação. Na Figura 36 é possível observar a capacidade de arrefecimento do

sistema. A capacidade de arrefecimento máxima do sistema é de 4 kW e ocorre às 17 horas de dia 6 de Julho encontrando-se o espaço a uma temperatura de 27,6 °C.

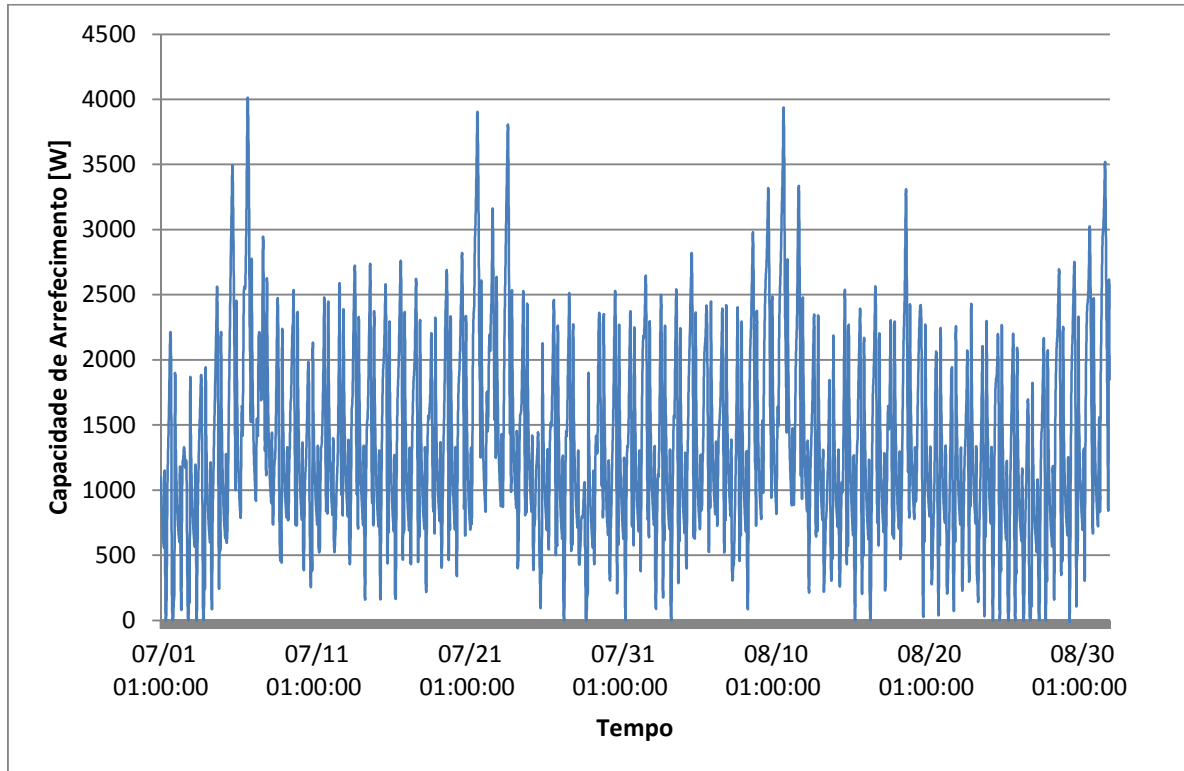


Figura 36 - Capacidade de arrefecimento do sistema com temperatura de mudança de fase 21 °C

Simulações semelhantes às apresentadas em cima foram realizadas para os restantes setpoints e também para um PCM com temperatura de mudança de fase de 23 °C. Na Tabela 10 são apresentados os resultados obtidos nessas simulações relativamente ao conforto térmico e aos consumos energéticos.

Tabela 10 - Resultados das simulações de conforto térmico e consumo energético para ambas as estratégias propostas

Setpoint de Activação do Sistema	Temperatura de Mudança de Fase	Desconforto Térmico [h]		Consumo Energético [kWh]
		Total	Entre 7 e as 11 h	
24 °C	T = 21 °C	237	199	560
	T = 23 °C	247	152	391
25 °C	T = 21 °C	180	139	475
	T = 23 °C	209	109	359
26 °C	T = 21 °C	271	113	393
	T = 23 °C	282	100	475

As horas em que se verifica desconforto térmico são calculadas pelo EnergyPlus tendo por base a norma ASHRAE 55-2004, como mencionado na secção 4.2.3, que avalia o conforto térmico baseado na temperatura operativa e humidade específica. Faz-se especial referência ao desconforto térmico que ocorre durante as primeiras horas da manhã. Neste período as temperaturas encontram-se em algumas ocasiões abaixo do intervalo de conforto devido ao arrefecimento do espaço durante a recarga do PCM que ocorre de noite. Este resultado é alvo de uma discussão mais aprofundada no capítulo 6.

Os resultados obtidos indicam que o sistema mais eficiente a nível energético é aquele que utiliza o PCM com mudança de fase aos 23 °C e setpoint de activação aos 25 °C. Relativamente ao conforto térmico verifica-se a ocorrência de menos horas de desconforto no caso do sistema com mudança de fase aos 21 °C.

## 5.2 Sistema Convencional

O sistema convencional, descrito na secção 4.5, composto por um ventilo-convector ligado ao chiller foi simulado para as mesmas condições. Considerou-se que o sistema manteria o espaço a uma temperatura inferior a 26 °C e que estaria activo durante o período de ocupação do espaço, entre as 7 e as 20 horas. Na Tabela 11 apresentam-se os resultados da simulação para o sistema convencional.

Tabela 11 -Resultados das simulações de conforto térmico e consumo energético para o sistema convencional

Modo de Funcionamento	Desconforto Térmico [h]		Consumo Energético [kWh]
	Total	Entre 7 e as 11 h	
Sistema Convencional	254	23	479

Verifica-se que os resultados obtidos para o sistema convencional foram piores do que aqueles obtidos para o sistema PCM. Ao nível do conforto térmico o sistema convencional obteve pior resultado relativamente ao número total de horas em que ocorreu desconforto térmico contudo houve uma redução relativamente ao desconforto térmico ocorrido no período da manhã. No caso do sistema PCM uma grande parte das horas de desconforto térmico ocorriam no período da manhã devido ao arrefecimento nocturno, no caso do sistema convencional o desconforto térmico ocorre maioritariamente nas horas de maior calor. Em termos do consumo energético, o sistema convencional gasta cerca de 33% mais energia do que o sistema PCM com mudança de fase aos 23 °C e setpoint de activação aos 25 °C.

## 6 Discussão dos Resultados

A simulação da eficiência energética realizada no EnergyPlus revelou que o sistema tem uma capacidade de resposta limitada. Quando se colocou o setpoint do sistema a 26 °C, temperatura limite de conforto térmico, ocorreram temperaturas próximas dos 28 °C demonstrando que o sistema não é capaz de responder imediatamente às necessidades do espaço. Este problema foi resolvido reduzindo o setpoint para 25 °C e permitindo dessa forma que o sistema respondesse gradualmente às necessidades do espaço. A nível do consumo energético não se entrou em conta com os consumos das bombas de circulação que no caso do sistema PCM podem ser significativos dada a necessidade de manter o fluido em circulação para que haja transferência de calor entre o PCM e o espaço.

Nos resultados relativos ao conforto térmico deu-se especial atenção à ocorrência de desconforto térmico durante as primeiras horas da manhã. Esta distinção é importante para a análise dos resultados das simulações em que ocorre recuperação do PCM durante o período nocturno. Quando esta ocorre, devido à baixa inércia térmica do espaço, a temperatura baixa rapidamente atingindo temperaturas próximas da do fluido de transferência de calor. Os efeitos dessa redução de temperaturas durante a noite prolongam-se durante as primeiras horas da manhã e resultam em condições de desconforto térmico segundo a norma ASHRAE 55. No entanto estas horas de desconforto poderão eventualmente ser desprezadas dada a altura em que ocorrem. Nas primeiras horas da manhã, mesmo nos dias de Verão, as temperaturas costumam ser relativamente baixas e dessa forma é previsível que as pessoas se vistam de acordo com as baixas temperaturas no início do dia e estejam preparadas para as temperaturas que ocorrem no interior do espaço nas primeiras horas da manhã. Segundos os dados climáticos utilizados neste trabalho, a temperatura exterior média entre as 7 e as 11 horas da manhã para o Porto nos meses de Julho e Agosto é de 19,5 °C enquanto a temperatura média verificada no interior do espaço climatizado pelo sistema PCM nesse mesmo período é de 23,2 °C.

Relativamente ao programa de simulação utilizado, o EnergyPlus, é importante referir que o modelo do balanço térmico assume várias suposições. A suposição mais importante é que o ar na zona térmica é modelado como bem misturado, isto é, assume-se que o ar tem uma temperatura uniforme em toda a zona. Desta forma não é contabilizada a estratificação de temperaturas no ar, uma situação que ocorre na realidade e que influencia a resposta do sistema.

## 7 Conclusões e Trabalhos Futuros

A utilização de materiais de mudança de fase tem sido alvo de vários estudos como possível solução para o problema de baixa inércia térmica nas construções de materiais leves, materiais tipicamente utilizados em construções sustentáveis que são cada vez mais comuns. Este trabalho teve como objectivo estudar uma forma inovadora de aplicar os formatos em que o PCM é disponibilizado no mercado de forma a torná-lo uma parte integrante do edifício e aumentar a eficiência da sua utilização.

Após um estudo dos produtos disponibilizados no mercado definiu-se três configurações possíveis para o sistema: configuração com encapsulamentos em forma de tubo e duas configurações com encapsulamentos em forma de placa de dois tamanhos diferentes. Uma análise paramétrica realizada no início do trabalho permitiu definir que a configuração de tubos apresenta os piores resultados das três enquanto ambas as configurações de placa apresentam resultados semelhantes, optando-se pela utilização da configuração com a placa de menores dimensões visto esta ocupar menos espaço. Através dessa análise paramétrica também se conclui que a velocidade do fluido de transferência de calor não apresenta uma influência significativa na capacidade de arrefecimento do sistema.

As simulações da aplicação do sistema PCM determinaram que o sistema apresenta uma capacidade de arrefecimento limitada. Quando se acciona o sistema apenas após a temperatura de conforto ser ultrapassada o sistema não é capaz de manter condições de conforto durante o dia. As temperaturas com o sistema a funcionar dessa forma atingiram nalguns dias cerca de 28 °C ultrapassando assim o limite de conforto de 26 °C estabelecido pela norma ASHRAE 55-2004. Esta incapacidade é justificada maioritariamente devido à baixa condutibilidade do PCM que dificulta a transferência de calor.

Em consequência desta incapacidade foram estudados diferentes setpoints de accionamento do sistema a temperaturas inferiores. Nesta abordagem foram comparados dois PCMs com temperaturas de mudança de fase diferentes, 21 e 23 °C, verificando-se melhores resultados

para o último caso. A utilização do sistema PCM com setpoint aos 25 °C permitiu uma redução de 25,1% nos consumos de energia eléctrica comparando com o sistema convencional.

A análise do conforto térmico revelou novamente vantagem na utilização do sistema PCM tendo-se verificado uma redução de 17,7% no total de horas desconfortáveis quando comparado com o sistema convencional. Os vários casos estudados relativos ao sistema PCM obtiveram resultados semelhantes em termos do valor total de horas desconfortáveis contudo apresentaram diferenças significativas relativamente a altura em que essas horas ocorrem. Quando é feita recarga do PCM no período nocturno mais de 50% das horas desconfortáveis ocorrem devido ao sobrearrefecimento provocado durante a noite e que se prolonga pelas primeiras horas da manhã enquanto no sistema convencional as horas de desconforto ocorrem durante o período de maior calor.

Como trabalho futuro sugere-se que seja feita uma análise das soluções aplicadas para melhorar a condutibilidade em sistemas que usem PCM e se estude a possibilidade de introduzi-las neste sistema. Acompanhando este processo seria aconselhável estudar o potencial de criar uma configuração própria para o sistema em vez de utilizar os encapsulamentos já disponíveis para o mercado. Sugere-se o estudo de uma configuração em que o PCM esteja em contacto directo com o espaço e a água circule no seu interior, passando a ser necessária a sua circulação apenas durante o período de recarga do PCM. Assim poderá ser possível também reduzir o comprimento total do sistema criando-se uma configuração mais compacta. Finalmente é necessário construir um protótipo do sistema de forma a concluir a validação do modelo numérico desenvolvido para a simulação do mesmo.



## 8 Referências Bibliográficas

- [1] Eurostat, “Panorama of energy: Energy statistics to support EU policies and solutions,” 2009.
- [2] Eurostat, “Energy price statistics,” 2013.
- [3] Bernstein, L, P Bosch, O Canziani, Z Chen, R Christ, and O Davidson, “Climate Change 2007: Synthesis Report,” IPCC, Valencia, Espanha, 2010.
- [4] European Union, “Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings.” 2003.
- [5] IEA, “Energy technology perspectives 2010. Scenarios & strategies to 2050.” 2010.
- [6] P. Bertoldi and B. Atanasiu, “Electricity Consumption and Efficiency Trends in European Union-Status Report 2009,” European Commission, Joint Research Center, Institute for Energy, Renewable Energy Unit, Joint Research Center (JRC), 2009.
- [7] European Union, “Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.” 2010.
- [8] European Commission, “Low Energy Buildings in Europe: Current State of Play, Definitions and Best practice.” 2009.
- [9] D. Langdon, “Life cycle costing (LCC) as a contribution to sustainable construction: a common methodology,” European Union, 2007.
- [10] H. M. Vermande and J. van der Heijden, “The Lead Market Initiative and Sustainable Construction: Lot 1, Screening of National Building Regulations,” PRC, 2011.
- [11] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, “Review on thermal energy storage with phase change materials and applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 2, pp. 318–345, Feb. 2009.
- [12] H. W. Ryu, S. W. Woo, B. C. Shin, and S. D. Kim, “Prevention of supercooling and stabilization of inorganic salt hydrates as latent heat storage materials,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 27, no. 2, pp. 161 – 172, 1992.
- [13] K. Yanbing, J. Yi, and Z. Yinping, “Modeling and experimental study on an innovative passive cooling system—NVP system,” *Energy and Buildings*, vol. 35, no. 4, pp. 417–425, May 2003.
- [14] S. Takeda, K. Nagano, T. Mochida, and K. Shimakura, “Development of a ventilation system utilizing thermal energy storage for granules containing phase change material,” *Solar Energy*, vol. 77, no. 3, pp. 329–338, Sep. 2004.
- [15] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, and H. Mehling, “Free-cooling of buildings with phase change materials,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 27, no. 8, pp. 839–849, Dec. 2004.
- [16] J. M. Marín, B. Zalba, L. F. Cabeza, and H. Mehling, “Improvement of a thermal energy storage using plates with paraffin–graphite composite,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, no. 12, pp. 2561–2570, Jun. 2005.

- [17] A. Waqas and S. Kumar, "Thermal performance of latent heat storage for free cooling of buildings in a dry and hot climate: An experimental study," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 10, pp. 2621–2630, Oct. 2011.
- [18] V. Butala and U. Stritih, "Experimental investigation of PCM cold storage," *Energy and Buildings*, vol. 41, no. 3, pp. 354–359, Mar. 2009.
- [19] J. R. Turnpenny, D. W. Etheridge, and D. A. Reay, "Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings.: Part I: testing and theoretical modelling," *Applied Thermal Engineering*, vol. 20, no. 11, pp. 1019–1037, Aug. 2000.
- [20] C. Arkar and S. Medved, "Free cooling of a building using PCM heat storage integrated into the ventilation system," *Solar Energy*, vol. 81, no. 9, pp. 1078–1087, Sep. 2007.
- [21] J. Prakash, H. P. Garg, and G. Datta, "A solar water heater with a built-in latent heat storage," *Energy Conversion and Management*, vol. 25, no. 1, pp. 51–56, 1985.
- [22] V. Martin, B. He, and F. Setterwall, "Direct contact PCM–water cold storage," *Applied Energy*, vol. 87, no. 8, pp. 2652–2659, Aug. 2010.
- [23] C. Voelker, O. Kornadt, and M. Ostry, "Temperature reduction due to the application of phase change materials," *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 5, pp. 937–944, 2008.
- [24] L. Shilei, F. Guohui, Z. Neng, and D. Li, "Experimental study and evaluation of latent heat storage in phase change materials wallboards," *Energy and Buildings*, vol. 39, no. 10, pp. 1088–1091, Oct. 2007.
- [25] F. Kuznik, J. Virgone, and J.-J. Roux, "Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation," *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 2, pp. 148–156, 2008.
- [26] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, and L. F. Cabeza, "Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling," *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 4, pp. 534–540, Apr. 2010.
- [27] C. Zhang, Y. Chen, L. Wu, and M. Shi, "Thermal response of brick wall filled with phase change materials (PCM) under fluctuating outdoor temperatures," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 12, pp. 3514–3520, Dec. 2011.
- [28] A. Carbonari, M. De Grassi, C. Di Perna, and P. Principi, "Numerical and experimental analyses of PCM containing sandwich panels for prefabricated walls," *Energy and Buildings*, vol. 38, no. 5, pp. 472–483, May 2006.
- [29] X. Wang and J. Niu, "Performance of cooled-ceiling operating with MPCM slurry," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 3, pp. 583–591, Mar. 2009.
- [30] T. Kondo and S. Iwamoto, "Research on Thermal Storage using Rock Wool PCM Ceiling Board," Kanagawa University, Japão, 2006.
- [31] M. Koschenz and B. Lehmann, "Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings," *Energy and Buildings*, vol. 36, no. 6, pp. 567–578, Jun. 2004.
- [32] R. Ansuini, R. Larghetti, A. Giretti, and M. Lemma, "Radiant floors integrated with PCM for indoor temperature control," *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 11, pp. 3019–3026, Nov. 2011.
- [33] "Disponível em: [www.pcmproducts.net](http://www.pcmproducts.net)."
- [34] T. L. Bergman, F. P. Incropera, A. S. Lavine, and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley, 2011.
- [35] V. Alexiades and A. D. Solomon, *Mathematical modeling of melting and freezing processes*. Hemisphere Publishing Corporation, 1993.
- [36] M. A. Ezan, "Design and optimization of ice-on-coil latent thermal storage system," Dokuz Eylül University, 2006.

- [37] M. Costa, D. Buddhi, and A. Oliva, "Numerical simulation of a latent heat thermal energy storage system with enhanced heat conduction," *Energy Conversion and Management*, vol. 39, no. 3–4, pp. 319–330, Feb. 1998.
- [38] C. Tzivanidis, K. A. Antonopoulos, and E. D. Kravvaritis, "Parametric analysis of space cooling systems based on night ceiling cooling with PCM-embedded piping," *International Journal of Energy Research*, vol. 36, no. 1, pp. 18–35, 2012.
- [39] K. Peippo, P. Kauranen, and P. D. Lund, "A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating," *Energy and Buildings*, vol. 17, no. 4, pp. 259–270, 1991.
- [40] K. Darkwa and P. W. O'Callaghan, "Simulation of phase change drywalls in a passive solar building," *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, no. 8–9, pp. 853–858, Jun. 2006.
- [41] D. A. Neeper, "Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage," *Solar Energy*, vol. 68, no. 5, pp. 393–403, 2000.
- [42] D. B. Crawley, L. K. Lawrie, F. C. Winkelmann, W. F. Buhl, Y. J. Huang, C. O. Pedersen, R. K. Strand, R. J. Liesen, D. E. Fisher, M. J. Witte, and J. Glazer, "EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program," *Energy and Buildings*, vol. 33, no. 4, pp. 319 – 331, 2001.
- [43] "Disponível em:  
[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/ep\\_interfaces.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/ep_interfaces.cfm)." .
- [44] H. Altan, J. Mohelnikova, O. Fric, and M. Kadlec, "Windows and building envelopes, and their influence on indoor thermal comfort," in *Proceedings of the 4th IASME/WSEAS international conference on Energy & environment*, Stevens Point, Wisconsin, USA, 2009, pp. 259–262.
- [45] C. Pina dos Santos and L. Matias, "Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios." LNEC, 2006.
- [46] N. F. R. Council, *NFRC 200: Procedure for Determining Fenestration Product Solar Heat Gain Coefficients at Normal Incidence*. NFRC, 1995.
- [47] "Decreto de Lei nº 79/2006 - Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios." .
- [48] "Decreto de Lei nº 80/2006 Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios." .
- [49] R. American Society of Heating and A.-C. Engineers, *ASHRAE Handbook of Fundamentals*. ASHRAE, 1967.
- [50] "Disponível em:  
[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata\\_about.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm)." .
- [51] Ashrae, *ANSI/ ASHRAE Standard 55-2004, Thermal Comfort Conditions for Human Occupancy*. American Society of Heating, Air-Conditioning, and Refrigeration Engineers, Inc., 2004.
- [52] Energy Design Resources, "HVAC Simulation Guidebook." Jul-2012.



## **ANEXO A: Programa Desenvolvido no EES**

## Estudo da Eficiência Energética de um Sistema de Arrefecimento com Materiais de Mudança de Fase

File:placapequena.EES

EES Ver. 9.178: #0725: For use by students and faculty in the Faculdade de Engenharia , D. Mech. Universidade do Porto

*Cálculo do calor transferido no sistema placa pequena dentro de tubo*

*Função do calculo do Cp ponderado com calor latente para o PCM*

Function **Cpl**<sub>PCM</sub> (T, T<sub>l</sub>, cp<sub>PCM</sub>, cl<sub>PCM</sub>)

$$T_s := T_l - 1$$

$$T_{liq} := T_l + 1$$

$$b := T_{liq} - T_s$$

$$H := cl_{PCM}$$

If [ T <= T<sub>l</sub> ] Then

If [ T > T<sub>s</sub> ] Then

$$Cpl_{PCM} := 4 \cdot \left[ \frac{H - cp_{PCM} \cdot b}{b^2} \right] \cdot [T - T_s] + cp_{PCM}$$

Else

$$Cpl_{PCM} := cp_{PCM}$$

Endif

Else

If [ T < T<sub>liq</sub> ] Then

$$Cpl_{PCM} := 4 \cdot \left[ \frac{cp_{PCM} \cdot b - H}{b^2} \right] \cdot \left[ T - \frac{b}{2} - T_s \right] + 2 \cdot \frac{H}{b} - cp_{PCM}$$

Else

$$Cpl_{PCM} := cp_{PCM}$$

Endif

Endif

End **Cpl**<sub>PCM</sub>

*Função Convecção Natural entre Tubo e ar da Sala*

Function **alpha**<sub>ar</sub> (T<sub>ar</sub>, T<sub>agua</sub>, D<sub>ext</sub>)

$$T_{filme} := \frac{T_{ar} + T_{agua}}{2}$$

$$v_{ar} := \frac{\text{Visc} ['Air_{ha}', T = T_{ar}, P = 101.3 \text{ [kPa]}]}{\rho ['Air_{ha}', T = T_{ar}, P = 101.3 \text{ [kPa]}]}$$

$$Ra_{steel} := 9.807 \text{ [m/s}^2] \cdot 0.3 \cdot D_{ext}^3 \cdot \left[ \frac{T_{ar} - T_{filme}}{v_{ar} \cdot 0.000019} \right]$$

$$\text{Call } \mathbf{FC}_{horizontal,cylinder,ND} [Ra_{steel}, \mathbf{Pr} ('Air_{ha}', T = T_{filme}, P = 101.3 \text{ [kPa]}) : \text{Nuss}_{steel}]$$

# Estudo da Eficiência Energética de um Sistema de Arrefecimento com Materiais de Mudança de Fase

File:placapequena.EES

EES Ver. 9.178: #0725: For use by students and faculty in the Faculdade de Engenharia, D. Mech. Universidade do Porto

$$\alpha_{ar} := \text{Nuss}_{steel} \cdot \frac{k ['Air_{ha}', T = T_{ar}, P = 101.3 \text{ [kPa]}]}{D_{ext}}$$

End **alpha**<sub>ar</sub>

## Função Convecção em Escoamento Interior Tubo-Água

Function **alpha**<sub>agua</sub> (T<sub>agua</sub>, P<sub>agua</sub>, LoverD, RelRough, v<sub>i</sub>, D<sub>h</sub>, D<sub>int</sub>)

$$\rho_{agua} := \rho ['Water', T = T_{agua}, P = P_{agua}]$$

$$v_{agua} := \frac{\text{Visc} ['Water', T = T_{agua}, P = P_{agua}]}{\rho ['Water', T = T_{agua}, P = P_{agua}]}$$

$$\text{Re} := v_i \cdot \frac{D_h}{v_{agua}}$$

Call **PipeFlow**<sub>N</sub> [Re, **Pr** ('Water', T = T<sub>agua</sub>, P = P<sub>agua</sub>), LoverD, RelRough : Nuss<sub>T</sub>, Nuss<sub>H</sub>, f:]

$$\alpha_{agua} := \text{Nuss}_H \cdot \frac{k ['Water', T = T_{agua}, P = P_{agua}]}{D_{int}}$$

End **alpha**<sub>agua</sub>

## Propriedades do PCM A21 PCMPRODUCTS

$$\rho_{PCM} = 785 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\lambda_{PCM} = 0.18 \text{ [W/(m}^{\circ}\text{K)]}$$

$$cl_{PCM} = 145000 \text{ [J/kg]}$$

$$cp_{PCM} = 2220 \text{ [J/(kg}^{\circ}\text{K)]}$$

$$T_i = 21$$

## Outras propriedades

$$v_i = 0.3$$

$$Cp = \text{Cp} ['Water', T = T_{w,0}, P = P_{agua}]$$

$$T_{ext} = 26$$

$$\rho = 998$$

## Definição do Objecto de Estudo

$$N = 7$$

$$\delta_y = \frac{0.015}{N + 1}$$

$$l_{tubo} = 430 \text{ [m]}$$

$$D_{ext} = 0.09 \text{ [m]}$$

$$D_{int} = 0.086 \text{ [m]}$$

## Estudo da Eficiência Energética de um Sistema de Arrefecimento com Materiais de Mudança de Fase

File:placapequena.EES

EES Ver. 9.178: #0725: For use by students and faculty in the Faculdade de Engenharia, D. Mech. Universidade do Porto

$$I_{\text{placa}} = 0.08$$

$$A = \pi \cdot \frac{D_{\text{int}}^2}{8}$$

$$P = \pi \cdot \frac{D_{\text{int}}}{2} + D_{\text{int}}$$

$$D_h = 4 \cdot \frac{A}{P}$$

### Auxiliares de Calculo

$$\text{LowerD} = \frac{I_{\text{tubo}}}{D_{\text{int}}}$$

$$\text{RelRough} = \frac{0.000015}{D_{\text{ext}}}$$

$$\text{linha} = \frac{\text{tempo}}{\delta_1} + 1$$

$$\delta_1 = 60$$

$$P_{\text{agua}} = 150 \text{ [kPa]}$$

### Variaveis do instante anterior

$$T_{0,i} = \text{TableValue} \left[ \text{'tabela'}, \text{linha} - 1, \text{'T}_i' \right] \quad \text{for } i = 0 \text{ to } 8$$

$$T_{w,0} = \text{TableValue} \left[ \text{'tabela'}, \text{linha} - 1, \text{'T}_{w,s}' \right]$$

$$T_w = \frac{T_{w,s} + T_{w,0}}{2}$$

### Coefficientes de transferencia de calor

$$\alpha_{\text{conv}} = \text{alpha}_{\text{agua}} \left[ T_{w,0}, P_{\text{agua}}, \text{LowerD}, \text{RelRough}, v_f, D_h, D_{\text{int}} \right]$$

$$\alpha_{\text{ar}} = \text{alpha}_{\text{ar}} \left[ T_{\text{ext}}, T_{w,0}, D_{\text{ext}} \right]$$

$$U_{\text{ar}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{ar}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{conv}}}}$$

### balanço dos nós interiores - de 1 a N

$$\rho_{\text{PCM}} \cdot \delta_y \cdot \text{Cpl}_{\text{PCM}} \left[ T_{0,i}, T_i, \text{cp}_{\text{PCM}}, \text{cl}_{\text{PCM}} \right] \cdot \left[ \frac{T_i - T_{0,i}}{\delta_t} \right] = \frac{\lambda_{\text{PCM}}}{\delta_y} \cdot [T_{i-1} + T_{i+1} - 2 \cdot T_i]$$

for i = 1 to N

### Fundo

$$\rho_{\text{PCM}} \cdot \text{Cpl}_{\text{PCM}} \left[ T_{0,0}, T_1, \text{cp}_{\text{PCM}}, \text{cl}_{\text{PCM}} \right] \cdot \frac{\delta_y}{2} \cdot \left[ \frac{T_0 - T_{0,0}}{\delta_t} \right] = \frac{\lambda_{\text{PCM}}}{\delta_y} \cdot [T_1 - T_0]$$

### Topo



## Estudo da Eficiência Energética de um Sistema de Arrefecimento com Materiais de Mudança de Fase

File:placapequena.EES

EES Ver. 9.178: #0725: For use by students and faculty in the Faculdade de Engenharia, D. Mech. Universidade do Porto

$$\rho_{PCM} \cdot Cpl_{PCM} [T_{0,8} - T_l] \cdot \frac{\delta_y}{2} \cdot \left[ \frac{T_8 - T_{0,8}}{\delta_t} \right] = \frac{\lambda_{PCM}}{\delta_y} \cdot [T_7 - T_8] + \alpha_{conv} \cdot [T_w - T_8]$$

Água

$$\rho \cdot Cp \cdot v_f \cdot A \cdot [T_{w,8} - T_{w,0}] = \alpha_{conv} \cdot l_{tubo} \cdot l_{placa} \cdot [T_8 - T_w] + U_{ar} \cdot \pi \cdot \frac{D_{ext}}{2} \cdot l_{tubo} \cdot [T_{ext} - T_w]$$

Calor total removido do espaço

$$Q_{ar} = [T_{ext} - T_w] \cdot D_{ext} \cdot \pi \cdot l_{tubo} \cdot \alpha_{ar}$$



## **ANEXO B: Módulo do Sistema PCM (EnergyPlus)**

```

MODULE HVACSystemaPCM
    ! Module containing routines dealing with an inovative cooling system using PCM

    ! MODULE INFORMATION:
    !     AUTHOR      André Santos
    !     DATE WRITTEN May 13, 2013
    !     MODIFIED     na
    !     RE-ENGINEERED na

    ! PURPOSE OF THIS MODULE:
    ! To encapsulate the data and algorithms needed to simulate a new cooling system using PCM

    ! METHODOLOGY EMPLOYED:
    ! The PCM system is treated as a terminal unit. There is a water flow delivered to the
    ! system that comes from a plant cooling system. When the plant is active the flow is cooled
    ! and used to remove heat from the PCM. When the plant is not active the flow is recirculated
    ! and it transfers heat to the PCM.

    ! USE STATEMENTS:
    USE DataPrecisionGlobals
    USE DataLoopNode
    USE DataGlobals, ONLY: BeginEnvrnFlag, MaxNameLength, NumOfZones, &
        InitConvTemp, SysSizingCalc, Pi, SecInHour, ScheduleAlwaysOn
    USE DataInterfaces, ONLY: ShowWarningError, ShowFatalError, ShowSevereError, ShowContinueError, &
        SetupOutputVariable
    ! Use statements for access to subroutines in other modules
    USE ScheduleManager
    USE DataHVACGlobals, ONLY: SmallMassFlow, SmallLoad, SmallAirVolFlow, TimeStepSys, SmallWaterVolFlow

    IMPLICIT NONE ! Enforce explicit typing of all variables
    PRIVATE ! Everything private unless explicitly made public

    ! DERIVED TYPE DEFINITIONS:
    TYPE PCMSystemData
        ! input data
        CHARACTER(len=MaxNameLength) :: Name           =' ' ! name of unit
        CHARACTER(len=MaxNameLength) :: UnitType        =' ' ! type of unit
        INTEGER :: UnitType_Num                        =0 ! index to type of unit = 1 (there's only 1
        type so far)
        CHARACTER(len=MaxNameLength) :: Sched           =' ' ! PCM Recharging Schedule
        INTEGER :: SchedPtr                             =0 ! index to schedule
        REAL(r64) :: SystemLength                       =0.0 ! length of system [m]
        REAL(r64) :: PCMArea                             =0.0 ! PCM surface area per system length [m2/m]
        REAL(r64) :: rhoPCM                             =0.0 ! density of PCM
        REAL(r64) :: condPCM                             =0.0 ! PCM thermal conductivity
        REAL(r64) :: ClPCM                              =0.0 ! PCM latent heat
        REAL(r64) :: CpPCM                              =0.0 ! PCM sensible heat
        REAL(r64) :: TlPCM                              =0.0 ! PCM phase change temperature
        REAL(r64) :: ExDiam                             =0.0 ! Outside diameter
        REAL, ALLOCATABLE, DIMENSION(:) :: NodePCM      ! PCM Node
        INTEGER :: NodeWater                             =0.0 ! Water Node
        INTEGER :: CWInNode                             =0.0 ! chilled water inlet node
        INTEGER :: CWOutNode                             =0.0 ! chilled water outlet node
        REAL(r64) :: qar                                 =0.0 ! PCM thermal conductivity
        ! time step variables
        REAL(r64) :: TWIn                               =0.0 ! current inlet water temperature [C]
        REAL(r64) :: TWOut                             =0.0 ! current putlet water temperature [C]
        REAL(r64) :: CoolWaterMassFlow                 =0.0 ! chilled water mass flow rate [kg/s]
        REAL(r64) :: PCMCoolingEnergy                  =0.0 ! PCM cooling energy of all system [J]
        REAL(r64) :: PCMCoolingRate                    =0.0 ! PCM cooling rate of all system [W]
        REAL(r64) :: Tpcm                              =0.0 ! PCM Temperature
        INTEGER :: CWLoopNum = 0 ! cooling water plant loop index number
        INTEGER :: CWLoopSideNum = 0 ! cooling water plant loop side index
        INTEGER :: CWBranchNum = 0 ! cooling water plant loop branch index
        INTEGER :: CWCompNum = 0 ! cooling water plant loop component index
    END TYPE PCMSystemData

```

```

! MODULE VARIABLE DECLARATIONS:
TYPE (PCMSystemData), ALLOCATABLE, DIMENSION(:) :: PCMSystem
LOGICAL, ALLOCATABLE, DIMENSION(:) :: CheckEquipName
INTEGER :: NumPCM = 0

! SUBROUTINE SPECIFICATIONS FOR MODULE HVACSystemaPCM:
PUBLIC SimPCM
PRIVATE GetPCM
PRIVATE InitPCM
!PRIVATE SizePCM For now, the system is not autosizable so there is no need ofr this subroutine
PRIVATE CalcPCM
PRIVATE ControlPCM
PRIVATE UpdatePCM
PRIVATE ReportPCM
PRIVATE CpEff
PRIVATE gaussian_solve
PRIVATE gaussian_elimination
PRIVATE back_substitution

CONTAINS

SUBROUTINE SimPCM(CompName, FirstHVACIteration, ZoneNum, ZoneNodeNum, CompIndex, NonAirSysOutput)
! SUBROUTINE INFORMATION:
!   AUTHOR      André Santos
!   DATE WRITTEN May 13, 2013
!   MODIFIED    na
!   RE-ENGINEERED na

! PURPOSE OF THIS SUBROUTINE:
! Manages the simulation of a PCM unit.
! Called from module ZoneEquipmentManager.

! USE STATEMENTS:
USE InputProcessor, ONLY: FindItemInList
USE DataSizing, ONLY: TermUnitIU
USE General, ONLY: TrimSigDigits

IMPLICIT NONE ! Enforce explicit typing of all variables in this routine
! SUBROUTINE ARGUMENT DEFINITIONS:
CHARACTER(len=*), INTENT(IN) :: CompName ! name of the PCM unit
LOGICAL, INTENT (IN) :: FirstHVACIteration ! TRUE if first HVAC iteration in time step
INTEGER, INTENT (IN) :: ZoneNum ! index of zone served by the unit
INTEGER, INTENT (IN) :: ZoneNodeNum ! zone node number of zone served by the unit
INTEGER, INTENT (INOUT) :: CompIndex ! which PCM unit in data structure
REAL(r64) :: NonAirSysOutput ! convective cooling by the PCM system [W]

! SUBROUTINE LOCAL VARIABLE DECLARATIONS:
INTEGER :: PCMNum ! index of PCM unit being simulated
LOGICAL, SAVE :: GetInputFlag = .TRUE. ! First time, input is "gotten"

! First time SimIndUnit is called, get the input for all the PCM units
IF (GetInputFlag) THEN
  CALL GetPCM
  GetInputFlag = .FALSE.
END IF

! Get the unit index
IF (CompIndex == 0) THEN
  PCMNum = FindItemInList(CompName, PCMSystem%Name, NumPCM)
  IF (PCMNum == 0) THEN
    CALL ShowFatalError('SimPCM: PCM Unit not found="//TRIM(CompName)')
  ENDIF
  CompIndex=PCMNum
ELSE
  PCMNum=CompIndex
  IF (PCMNum > NumPCM .or. PCMNum < 1) THEN

```

```

CALL ShowFatalError('SimPCM: Invalid CompIndex passed='//TRIM(TrimSigDigits(CompIndex))// &
                    ', Number of PCM Units='//TRIM(TrimSigDigits(NumPCM))//          &
                    ', System name='//TRIM(CompName))
ENDIF
IF (CheckEquipName(PCMNum)) THEN
  IF (CompName /= PCMSysSystem(PCMNum)%Name) THEN
    CALL ShowFatalError('SimPCM: Invalid CompIndex passed='//TRIM(TrimSigDigits(CompIndex))//          &
                        ', PCM Unit name='//TRIM(CompName)//', stored PCM Unit for that index='//          &
                        TRIM(PCMSysSystem(PCMNum)%Name))
  ENDIF
  CheckEquipName(PCMNum)=.false.
ENDIF
ENDIF

IF (PCMNum .EQ. 0) THEN
  CALL ShowFatalError('PCM Unit not found = '//TRIM(CompName))
END IF

! initialize the unit
CALL InitPCM(PCMNum,FirstHVACIteration,ZoneNum)

CALL ControlPCM(PCMNum,ZoneNum,ZoneNodeNum,FirstHVACIteration,NonAirSysOutput)

! Update the current unit's outlet nodes
CALL UpdatePCM(PCMNum)

! Fill the report variables
CALL ReportPCM(PCMNum)

RETURN

END SUBROUTINE SimPCM

SUBROUTINE GetPCM
  ! SUBROUTINE INFORMATION:
  !   AUTHOR      André Santos
  !   DATE WRITTEN May 13, 2013
  !   MODIFIED    na
  !   RE-ENGINEERED na

  ! PURPOSE OF THIS SUBROUTINE:
  ! Obtains input data for PCM units and stores it in the
  ! PCM unit data structures

  ! METHODOLOGY EMPLOYED:
  ! Uses "Get" routines to read in data.

  ! USE STATEMENTS:
  USE InputProcessor, ONLY: GetNumObjectsFound, GetObjectItem, VerifyName, SameString,
    GetObjectDefMaxArgs
  USE NodeInputManager, ONLY: GetOnlySingleNode
  USE BranchNodeConnections, ONLY: TestCompSet, SetUpCompSets
  USE DataZoneEquipment, ONLY: ZoneEquipConfig
  USE DataSizing
  USE DataIPShortCuts
  USE General, ONLY: TrimSigDigits

  IMPLICIT NONE ! Enforce explicit typing of all variables in this routine

  ! SUBROUTINE PARAMETER DEFINITIONS:
  CHARACTER(len=*) PARAMETER :: RoutineName='GetPCM '
  INTEGER :: PCMIndex ! loop index
  INTEGER :: PCMNum ! current PCM number
  CHARACTER(len=MaxNameLength) :: CurrentModuleObject
  CHARACTER(len=MaxNameLength), ALLOCATABLE, DIMENSION(:) :: Alphas ! Alpha input items for object
  CHARACTER(len=MaxNameLength), ALLOCATABLE, DIMENSION(:) :: cAlphaFields ! Alpha field names

```

```

CHARACTER(len=MaxNameLength), ALLOCATABLE, DIMENSION(:) :: cNumericFields ! Numeric field names
REAL(r64), ALLOCATABLE, DIMENSION(:) :: Numbers ! Numeric input items for object
LOGICAL, ALLOCATABLE, DIMENSION(:) :: lAlphaBlanks ! Logical array, alpha field input BLANK = .
true.
LOGICAL, ALLOCATABLE, DIMENSION(:) :: lNumericBlanks ! Logical array, numeric field input BLANK = .
true.
INTEGER :: NumAlphas=0 ! Number of Alphas for each GetObjectItem call
INTEGER :: NumNumbers=0 ! Number of Numbers for each GetObjectItem call
INTEGER :: TotalArgs=0 ! Total number of alpha and numeric arguments (max) for a certain object in the
input file
INTEGER :: IOStatus ! Used in GetObjectItem
LOGICAL :: ErrorsFound=.false. ! Set to true if errors in input, fatal at end of routine
LOGICAL :: IsNotOK ! Flag to verify name
LOGICAL :: IsBlank ! Flag for blank name
INTEGER :: n ! Number of elements in which the PCM is divided
INTEGER :: i ! Counter
! find the number of PCM units
CurrentModuleObject = 'AirTerminal:SingleDuct:SistemaPCM'
NumPCM = GetNumObjectsFound(CurrentModuleObject)
n = 9

! allocate the data structures
ALLOCATE(PCMSystem(NumPCM))
ALLOCATE(CheckEquipName(NumPCM))
ALLOCATE (PCMSystem(NumPCM)%nodePCM(n))
CheckEquipName=.true.

CALL GetObjectDefMaxArgs(CurrentModuleObject,TotalArgs,NumAlphas,NumNumbers)
NumAlphas = 7
NumNumbers = 10
TotalArgs = 17

ALLOCATE(Alphas(NumAlphas))
Alphas=' '
ALLOCATE(cAlphaFields(NumAlphas))
cAlphaFields=' '
ALLOCATE(cNumericFields(NumNumbers))
cNumericFields=' '
ALLOCATE(Numbers(NumNumbers))
Numbers=0.0
ALLOCATE(lAlphaBlanks(NumAlphas))
lAlphaBlanks=.true.
ALLOCATE(lNumericBlanks(NumNumbers))
lNumericBlanks=.true.

! loop over PCM units; get and load the input data
DO PCMIndex = 1,NumPCM
CALL GetObjectItem(CurrentModuleObject,PCMIndex,Alphas,NumAlphas,Numbers,NumNumbers,IOStatus, &
NumBlank=lNumericBlanks,AlphaBlank=lAlphaBlanks, &
AlphaFieldNames=cAlphaFields,NumericFieldNames=cNumericFields)

PCMNum = PCMIndex
IsNotOK=.FALSE.
IsBlank=.FALSE.

CALL VerifyName(Alphas(1),PCMSystem%Name,PCMNum-1,IsNotOK,IsBlank,TRIM(CurrentModuleObject)//' Name')
IF (IsNotOK) THEN
ErrorsFound=.true.
IF (IsBlank) Alphas(1)='xxxxx'
ENDIF

PCMSystem(PCMNum)%Name = Alphas(1)
PCMSystem(PCMNum)%UnitType = CurrentModuleObject
PCMSystem(PCMNum)%UnitType_Num = 1
PCMSystem(PCMNum)%Sched = Alphas(2)

IF (lAlphaBlanks(2)) THEN

```

```

    PCMSystem(PCMNum)%SchedPtr = ScheduleAlwaysOff
ELSE
    PCMSystem(PCMNum)%SchedPtr = GetScheduleIndex(Alphas(2)) ! convert schedule name to pointer
    IF (PCMSystem(PCMNum)%SchedPtr .EQ. 0) THEN
        CALL ShowSevereError(RoutineName//TRIM(CurrentModuleObject)//': invalid '//TRIM(cAlphaFields(2))//
    &
        ' entered '//TRIM(Alphas(2))// &
        ' for '//TRIM(cAlphaFields(1))//'='//TRIM(Alphas(1)))
        ErrorsFound=.TRUE.
    END IF
END IF

DO i=1,n
    PCMSystem(PCMNum)%NodePCM(i) = &
        GetOnlySingleNode(i,ErrorsFound,TRIM(CurrentModuleObject),Alphas(1), &
            NodeType_Unknown,NodeConnectionType_Internal,1,ObjectIsNotParent,i)
END DO

PCMSystem(PCMNum)%NodeWater = &
    GetOnlySingleNode(Alphas(5),ErrorsFound,TRIM(CurrentModuleObject),Alphas(1), &
        NodeType_Water,NodeConnectionType_Outlet,1,ObjectIsNotParent,cAlphaFields(5))
PCMSystem(PCMNum)%CwInNode = &
    GetOnlySingleNode(Alphas(6),ErrorsFound,TRIM(CurrentModuleObject),Alphas(1), &
        NodeType_Water,NodeConnectionType_Inlet,2,ObjectIsNotParent,cAlphaFields(6))
PCMSystem(PCMNum)%CwOutNode = &
    GetOnlySingleNode(Alphas(7),ErrorsFound,TRIM(CurrentModuleObject),Alphas(1), &
        NodeType_Water,NodeConnectionType_Outlet,2,ObjectIsNotParent,cAlphaFields(7))

PCMSystem(PCMNum)%CondPCM = Numbers(1)
PCMSystem(PCMNum)%RhoPCM = Numbers(2)
PCMSystem(PCMNum)%ClPCM = Numbers(3)
PCMSystem(PCMNum)%CpPCM = Numbers(4)
PCMSystem(PCMNum)%TlPCM = Numbers(5)
PCMSystem(PCMNum)%SystemLength = Numbers(6)
PCMSystem(PCMNum)%ExDiam = Numbers(7)
PCMSystem(PCMNum)%CoolWaterMassFlow = 1.34

!Setup the Cooled Beam reporting variables
CALL SetupOutputVariable('Temperatura do PCM [C]', PCMSystem(PCMNum)%Tpcm, &
    'System','Average',PCMSystem(PCMNum)%Name)
CALL SetupOutputVariable('Temperatura da Agua [C]', PCMSystem(PCMNum)%TWout, &
    'System','Average',PCMSystem(PCMNum)%Name)
CALL SetupOutputVariable('Calor Ar [W]', PCMSystem(PCMNum)%qar, &
    'System','Average',PCMSystem(PCMNum)%Name)
END DO

DEALLOCATE(Alphas)
DEALLOCATE(cAlphaFields)
DEALLOCATE(cNumericFields)
DEALLOCATE(Numbers)
DEALLOCATE(lAlphaBlanks)
DEALLOCATE(lNumericBlanks)

IF (ErrorsFound) THEN
    CALL ShowFatalError(RoutineName//'Errors found in getting input. Preceding conditions cause termination'
    .')
END IF

RETURN

END SUBROUTINE GetPCM

SUBROUTINE InitPCM(PCMNum,FirstHVACIteration,ZoneNodeNum)

    ! SUBROUTINE INFORMATION:
    !     AUTHOR      André Santos

```



```

!      DATE WRITTEN   May 13, 2013
!      MODIFIED      na
!      RE-ENGINEERED na

! PURPOSE OF THIS SUBROUTINE:
! This subroutine is for initialization of the cooled beam units

! METHODOLOGY EMPLOYED:
! Uses the status flags to trigger initializations.

! USE STATEMENTS:
USE DataZoneEquipment, ONLY: ZoneEquipInputsFilled, CheckZoneEquipmentList
USE InputProcessor,     ONLY: SameString
USE DataPlant,          ONLY: PlantLoop, ScanPlantLoopsForObject, TypeOf_PCMSystem
USE PlantUtilities,     ONLY: InitComponentNodes, SetComponentFlowRate
USE DataInterfaces,     ONLY: ShowWarningError

IMPLICIT NONE ! Enforce explicit typing of all variables in this routine
! SUBROUTINE ARGUMENT DEFINITIONS:
INTEGER, INTENT (IN) :: PCMNum ! number of the current PCM unit being simulated
LOGICAL, INTENT (IN) :: FirstHVACIteration ! TRUE if first air loop solution this HVAC step
INTEGER, INTENT (IN) :: ZoneNodeNum ! zone node number of zone served by the unit

! SUBROUTINE LOCAL VARIABLE DECLARATIONS:
INTEGER :: InWaterNode ! unit inlet chilled water node
INTEGER :: OutWaterNode ! unit outlet chilled water node
REAL(r64) :: ZTemp ! zone air temperature [C]
LOGICAL, SAVE :: MyOneTimeFlag = .true.
LOGICAL, ALLOCATABLE, Save, DIMENSION(:) :: MyEnvrnFlag
LOGICAL, ALLOCATABLE, Save, DIMENSION(:) :: PlantLoopScanFlag
REAL(r64) :: rho ! local fluid density
REAL(r64) :: onoff ! Variable to check if Chiller is on or off
REAL(r64) :: TWout ! Leaving Water Temperature
LOGICAL, SAVE :: ZoneEquipmentListChecked = .false. ! True after the Zone Equipment List has been
checked for items
CHARACTER(len=MaxNameLength) :: CurrentModuleObject
LOGICAL :: errFlag
CurrentModuleObject = 'AirTerminal:SingleDuct:SistemaPCM'

! Do the one time initializations
IF (MyOneTimeFlag) THEN
  ALLOCATE(MyEnvrnFlag(PCMNum))
  ALLOCATE(PlantLoopScanFlag(PCMNum))
  MyEnvrnFlag = .TRUE.
  PlantLoopScanFlag = .TRUE.
  MyOneTimeFlag = .FALSE.
END IF
!Set Zone temperature and water leaving temperature from last timestep
ZTemp = Node(ZoneNodeNum)%Temp
TWout = Node(PCMSystem(PCMNum)%NodeWater)%Temp

IF (PCMSystem(PCMNum)%SchedPtr > 0) THEN
  onoff = GetCurrentScheduleValue(PCMSystem(PCMNum)%SchedPtr)
END IF

!If Schedule value is 1 then PCM is charging and Chiller is on
IF (onoff == 1) THEN
  !Establish connection between PCM system and Plant equipment
  IF (TWout > 19.1) THEN
    CALL ScanPlantLoopsForObject(PCMSystem(PCMNum)%Name, &
                                TypeOf_PCMSystem, &
                                PCMSystem(PCMNum)%CWLoopNum, &
                                PCMSystem(PCMNum)%CWLoopSideNum, &
                                PCMSystem(PCMNum)%CWBranchNum, &
                                PCMSystem(PCMNum)%CWCompNum, &
                                errFlag=errFlag)
  
```

```

        IF (errFlag) THEN
            CALL ShowFatalError('InitPCM: Program terminated for previous conditions.')
        ENDIF
        PlantLoopScanFlag(PCMNum) = .FALSE.
    ELSE
        PCMSystem(PCMNum)%CWLoopNum = 0
        PCMSystem(PCMNum)%CWLoopSideNum = 0
        PCMSystem(PCMNum)%CWBranchNum = 0
        PCMSystem(PCMNum)%CWCompNum = 0
        PlantLoopScanFlag(PCMNum) = .TRUE.
    ENDIF

    IF (.not. ZoneEquipmentListChecked .and. ZoneEquipInputsFilled) THEN
        ZoneEquipmentListChecked=.true.
    ENDIF

    IF (.NOT. PlantLoopScanFlag(PCMNum)) THEN
        InWaterNode = PCMSystem(PCMNum)%CWInNode
        OutWaterNode = PCMSystem(PCMNum)%CWOutNode

        CALL InitComponentNodes(0.d0, PCMSystem(PCMNum)%coolwatermassflow, &
                                InWaterNode, OutWaterNode, &
                                PCMSystem(PCMNum)%CWLoopNum, &
                                PCMSystem(PCMNum)%CWLoopSideNum, &
                                PCMSystem(PCMNum)%CWBranchNum, &
                                PCMSystem(PCMNum)%CWCompNum)

    END IF

    IF (BeginEnvrnFlag .and. MyEnvrnFlag(PCMNum)) THEN
        ! set the mass flow rates
        InWaterNode = PCMSystem(PCMNum)%CWInNode
        OutWaterNode = PCMSystem(PCMNum)%CWOutNode
        Call InitComponentNodes(0.d0, PCMSystem(PCMNum)%coolwatermassflow, &
                                InWaterNode, OutWaterNode, &
                                PCMSystem(PCMNum)%CWLoopNum, &
                                PCMSystem(PCMNum)%CWLoopSideNum, &
                                PCMSystem(PCMNum)%CWBranchNum, &
                                PCMSystem(PCMNum)%CWCompNum)

        MyEnvrnFlag(PCMNum) = .FALSE.
    END IF ! end one time inits

    IF (.not. BeginEnvrnFlag) THEN
        MyEnvrnFlag(PCMNum) = .true.
    ENDIF

    RETURN
END SUBROUTINE InitPCM

SUBROUTINE ControlPCM(PCMNum,ZoneNum,ZoneNodeNum,FirstHVACIteration,NonAirSysOutput)
    ! SUBROUTINE INFORMATION:
    !     AUTHOR      André Santos
    !     DATE WRITTEN May 13, 2013
    !     MODIFIED    na
    !     RE-ENGINEERED na

    ! PURPOSE OF THIS SUBROUTINE:
    ! Simulate a PCM unit;

    ! USE STATEMENTS:
    USE DataZoneEnergyDemands
    USE PlantUtilities, ONLY:SetComponentFlowRate
    IMPLICIT NONE ! Enforce explicit typing of all variables in this routine
    ! SUBROUTINE ARGUMENT DEFINITIONS:
    LOGICAL, INTENT (IN) :: FirstHVACIteration ! TRUE if 1st HVAC simulation of system timestep
    INTEGER, INTENT (IN) :: PCMNum             ! number of the current unit being simulated

```

```

INTEGER, INTENT (IN) :: ZoneNum          ! number of zone being served
INTEGER, INTENT (IN) :: ZoneNodeNum      ! zone node number
REAL(r64), INTENT (OUT) :: NonAirSysOutput ! convective cooling by the PCM system [W]

! SUBROUTINE LOCAL VARIABLE DECLARATIONS:
REAL(r64) :: PowerMet=0.0 ! power supplied
REAL(r64) :: TWOut=0.0 ! outlet water temperature [C]
REAL(r64) :: mdot=0.0 ! cold water flow [kg/s]
INTEGER :: ControlNode ! the water inlet node

mdot = 1.34
!Establish the flow rate in the system nodes
CALL SetComponentFlowRate(mdot,
                           &
                           PCMSys(PCMNum)%CWInNode, &
                           PCMSys(PCMNum)%CWOutNode, &
                           PCMSys(PCMNum)%CWLoopNum, &
                           PCMSys(PCMNum)%CWLoopSideNum, &
                           PCMSys(PCMNum)%CWBranchNum, &
                           PCMSys(PCMNum)%CWCompNum)

! Get the cooling output at the chosen water flow rate
CALL CalcPCM(PCMNum, ZoneNodeNum, CWFlow, PowerMet, TWOut, FirstHVACIteration)

!Set the cooling capacity of the system in the output variable PCMCoolingRate
PCMSys(PCMNum)%PCMCoolingRate = -PowerMet
!Set the water outlet temperature the output variable TWOut
PCMSys(PCMNum)%TWOut = TWOut
!Set the variable that will be involved in the zone heat balance
NonAirSysOutput = -PowerMet

RETURN

END SUBROUTINE ControlPCM

SUBROUTINE CalcPCM(PCMNum, ZoneNode, mdot, LoadMet, TWOut, FirstHVACIteration)
! SUBROUTINE INFORMATION:
!   AUTHOR      André Santos
!   DATE WRITTEN May 13, 2013
!   MODIFIED    na
!   RE-ENGINEERED na

! PURPOSE OF THIS SUBROUTINE:
! Simulate a PCM unit given the chilled water flow rate

! METHODOLOGY EMPLOYED:
! Uses the PCM equations;

! USE STATEMENTS:
USE PlantUtilities, ONLY: SetComponentFlowRate
USE FluidProperties, ONLY: GetSpecificHeatGlycol, GetDensityGlycol
USE DataPlant, ONLY: PlantLoop
USE DataInterfaces, ONLY: ShowWarningError
USE ScheduleManager, ONLY: GetCurrentScheduleValue

IMPLICIT NONE ! Enforce explicit typing of all variables in this routine

! SUBROUTINE ARGUMENT DEFINITIONS:
INTEGER, INTENT (IN) :: PCMNum ! Unit index
INTEGER, INTENT (IN) :: ZoneNode ! zone node number
REAL(r64), INTENT (IN) :: mdot ! cold water flow [kg/s]
REAL(r64), INTENT (OUT) :: LoadMet ! load met by unit [W]
REAL(r64), INTENT (OUT) :: TWOut ! chilled water outlet temperature [C]
LOGICAL, INTENT (IN) :: FirstHVACIteration ! TRUE if 1st HVAC simulation of system timestep

! SUBROUTINE LOCAL VARIABLE DECLARATIONS:
INTEGER :: i ! Counter

```

```

INTEGER :: j                ! Counter
REAL(r64) :: TWin          ! Inlet water temperature [C]
REAL(r64) :: Tpcm          ! PCM average temperature [C]
REAL(r64) :: Tsetpoint     ! Setpoint temperature [C]
REAL(r64) :: ZTemp         ! zone air temperature [C]
REAL(r64) :: Aext          ! exterior pipe area [m2]
REAL(r64) :: hf            ! Convection coefficient for the water flow
REAL(r64) :: har           ! Convection coefficient between air and pipe
REAL(r64) :: Uar           ! Heat transfer coefficient between air and water flow
REAL(r64) :: Qar           ! Heat exchanged between air and water flow
REAL(r64) :: dT            ! Auxiliary variable
REAL(r64) :: Cp            ! local fluid specific heat
REAL(r64) :: CsPCM         ! PCM specific heat considering Phase Change with the effectiveness method
REAL(r64) :: rho           ! local fluid density
REAL(r64) :: dy            ! PCM element thickness
REAL(r64) :: mPCM          ! PCM mass
REAL(r64) :: aPCM          ! PCM Area
REAL(r64) :: Tprev         ! Auxiliary variable to store PCM temperature
REAL(r64) :: onoff         ! Variable to check if Chiller is on or off
REAL(r64) :: deltat

! Allocatable arrays for coefficients
REAL, ALLOCATABLE, DIMENSION(:,:) :: a
REAL, ALLOCATABLE, DIMENSION(:) :: b
REAL, ALLOCATABLE, DIMENSION(:) :: TpcmSAVED

! Size of arrays
INTEGER :: n

! Loop variables and error flag
INTEGER :: error

! Allocate arrays
n = 10
ALLOCATE (a(n,n), b(n), TpcmSAVED(n-1))

!Get the length of the time interval simulated
deltat = TimeStepSys*SecInHour
!Set zone temperature
ZTemp = Node(ZoneNode)%Temp
!Set zone temperature setpoint
Tsetpoint = 25

IF (PCMSys(PCMNum)%SchedPtr > 0) THEN
    onoff = GetCurrentScheduleValue(PCMSys(PCMNum)%SchedPtr)
END IF

!If onoff = 1 then chiller is on and inlet temperature is chiller
!leaving temperature except if PCM is fully recharged then system is stopped
IF (onoff==1) THEN

    IF (TWout<19.1) THEN
        Return
    END IF
    TWin = Node(PCMSys(PCMNum)%CWOutNode)%Temp

ELSE
    !If onoff = 0 then chiller is off and inlet temperature is
    !the same as outlet temperature in the previous time interval
    IF (ZTemp<Tsetpoint) THEN
        Return
    END IF
    TWin = Node(PCMSys(PCMNum)%NodeWater)%Temp
END IF

CALL SetComponentFlowRate(mdot, &

```

```

PCMSystem(PCMNum)%CwInNode,    &
PCMSystem(PCMNum)%CwOutNode,   &
PCMSystem(PCMNum)%CwLoopNum,   &
PCMSystem(PCMNum)%CwLoopSideNum, &
PCMSystem(PCMNum)%CwBranchNum,  &
PCMSystem(PCMNum)%CwCompNum)

!Set water properties. Given the fact that water temperature varies little
!these properties can be considered constant
Cp = 4184
rho = 998

!Set constants
PCMSystem(PCMNum)%PCMArea = 0.08
dy = 0.015/(n-2)
mPCM = (PCMSystem(PCMNum)%rhoPCM * PCMSystem(PCMNum)%SystemLength * 0.015 * 0.080)/(n-2)
Apcm = PCMSystem(PCMNum)%PCMArea * PCMSystem(PCMNum)%SystemLength
Aext = 3.14*PCMSystem(PCMNum)%ExDiam*PCMSystem(PCMNum)%SystemLength/2

!Determine heat transfer coefficients
hf = -0.0458*TwIn*TwIn+13.759*TwIn+571.14
deltaT = abs(ZTemp - TwIn)
har = -0.0007*(dT)**4+0.0189*(dT)**3-0.2097*(dT)**2 + 1.5568 * dT + 4.0712
Uar = 1/(1/har+1/hf)

!Zero the matrix used to solve the equation system
DO i=1,n
  DO j=1,n
    a(i,j) = 0
  END DO
  b(i) = 0
END DO

!Determine the coefficients of the matrix
a(1,1) = Uar * Aext/2 + hf * aPCM/2 + mdot * Cp
a(1,2) = - hf * aPCM

b(1) = Uar * Aext * Ztemp - (Uar * Aext/2 + hf * aPCM /2 - mdot * Cp) * TwIn

Tprev = TpcmSAVED(1)
CsPCM = CpEff(Tprev,PCMSystem(PCMNum)%TlPCM,PCMSystem(PCMNum)%CpPCM,PCMSystem(PCMNum)%ClPCM)

a(2,1) = - hf * aPCM /2
a(2,2) = hf * aPCM + CsPCM * mPCM /(deltat*2) + PCMSystem(PCMNum)%CondPCM * aPCM / dy
a(2,3) = - PCMSystem(PCMNum)%CondPCM * aPCM / dy

b(2) = hf * aPCM * TwIn /2 + CsPCM * mPCM/(deltat*2) * TpcmSAVED(1)

DO i=2,n-2
  j = i+1
  Tprev = TpcmSAVED(i)
  CsPCM = CpEff(Tprev,PCMSystem(PCMNum)%TlPCM,PCMSystem(PCMNum)%CpPCM,PCMSystem(PCMNum)%ClPCM)

  a(j,j) = 2 * PCMSystem(PCMNum)%CondPCM * aPCM / dy + CsPCM * mPCM / deltat
  a(j,j-1) = -PCMSystem(PCMNum)%CondPCM * aPCM / dy
  a(j,j+1) = -PCMSystem(PCMNum)%CondPCM * aPCM / dy

  b(j) = CsPCM * mPCM/deltat * TpcmSAVED(i)
END DO

Tprev = TpcmSAVED(n-1)
CsPCM = CpEff(Tprev,PCMSystem(PCMNum)%TlPCM,PCMSystem(PCMNum)%CpPCM,PCMSystem(PCMNum)%ClPCM)

a(n,n-1) = -PCMSystem(PCMNum)%CondPCM * aPCM / dy
a(n,n) = PCMSystem(PCMNum)%CondPCM * aPCM / dy + CsPCM * mPCM /(deltat*2)

```

```

b(n) = CsPCM * mPCM/(deltat*2) * TpcmSAVED(n-1)

!Use Gaussian elimination to solve equations
Call gaussian_solve(a,b,error)

! Check to see if there were any errors
IF (error <= -1 .AND. error >= -3 ) THEN
    CALL ShowFatalError('Error in call to gaussian_solve')

ELSE IF (error == -4) THEN
    CALL ShowFatalError('System is degenerate')

ELSE
    !If no errors set results in output variables
    Twout = b(1)
    Node(PCMSystem(PCMNum)%NodeWater)%Temp = Twout
    Tpcm = b(2)/2
    Node(PCMSystem(PCMNum)%NodePCM(1))%Temp = b(2)

    DO i=2,n-2
        Node(PCMSystem(PCMNum)%NodePCM(i))%Temp = b(i+1)
        Tpcm = Tpcm + b(i+1)
    END DO

    Node(PCMSystem(PCMNum)%NodePCM(9))%Temp = b(10)
    Tpcm = Tpcm + b(10)/2
    Tpcm = Tpcm/(n-2)
    Qar = Uar * Aext * (ZTemp - (Twout+TwIn)/2)
END IF

!Load met by system is twice the load calculated since only half the system is analyzed
LoadMet = 2*Qar

!Store the output variables
PCMSystem(PCMNum)%Twout = Twout
PCMSystem(PCMNum)%Tpcm = Tpcm
PCMSystem(PCMNum)%qar=LoaMet

RETURN

END SUBROUTINE CalcPCM

SUBROUTINE UpdatePCM(PCMNum)
    ! SUBROUTINE INFORMATION:
    !     AUTHOR      André Santos
    !     DATE WRITTEN May 13, 2013
    !     MODIFIED     na
    !     RE-ENGINEERED na

    ! PURPOSE OF THIS SUBROUTINE:
    ! This subroutine updates the PCM unit outlet nodes

    ! METHODOLOGY EMPLOYED:
    ! Data is moved from the PCM unit data structure to the unit outlet nodes.

    IMPLICIT NONE      ! Enforce explicit typing of all variables in this routine

    ! SUBROUTINE ARGUMENT DEFINITIONS:
    Integer, Intent(In) :: PCMNum

    ! SUBROUTINE LOCAL VARIABLE DECLARATIONS:
    Integer :: WaterInletNode
    Integer :: WaterOutletNode

    WaterInletNode = PCMSystem(PCMNum)%CWInNode
    WaterOutletNode = PCMSystem(PCMNum)%CWOutNode

```

```

Node(WaterOutletNode)%Temp = PCMSystem(PCMNum)%TWOut

RETURN

END SUBROUTINE UpdatePCM

SUBROUTINE ReportPCM(PCMNum)
  ! SUBROUTINE INFORMATION:
  !   AUTHOR      André Santos
  !   DATE WRITTEN May 13, 2013
  !   MODIFIED    na
  !   RE-ENGINEERED na

  ! PURPOSE OF THIS SUBROUTINE:
  ! This subroutine updates the report variable for the PCM units

  ! USE STATEMENTS:

  IMPLICIT NONE      ! Enforce explicit typing of all variables in this routine
  ! SUBROUTINE ARGUMENT DEFINITIONS:
  Integer, Intent(IN) :: PCMNum

  ! SUBROUTINE LOCAL VARIABLE DECLARATIONS:
  REAL(r64) :: ReportingConstant

  ReportingConstant = TimeStepSys*SecInHour
  ! report the energy from this component
  PCMSystem(PCMNum)%PCMCoolingEnergy = PCMSystem(PCMNum)%PCMCoolingRate*ReportingConstant

  RETURN
END Subroutine ReportPCM

SUBROUTINE gaussian_solve(a,b,error)
  ! This subroutine solves the linear system Ax = b
  ! where the coefficients of A are stored in the array a
  ! The solution is put in the array b
  ! error indicates if errors are found

  ! Dummy arguments
  USE DataInterfaces, ONLY: ShowWarningError
  REAL, DIMENSION(:,:), INTENT(INOUT) :: a
  REAL, DIMENSION(:), INTENT(INOUT) :: b
  INTEGER, INTENT(OUT) :: error
  REAL(r64) :: Qar = 0.d0
  ! Reduce the equations by Gaussian elimination

  CALL gaussian_elimination(a,b,error)

  ! If reduction was successful, calculate solution by
  ! back substitution
  IF (error == 0) CALL back_substitution(a,b,error)

END SUBROUTINE gaussian_solve

SUBROUTINE gaussian_elimination(a,b,error)
  ! This subroutine performs Gaussian elimination on a
  ! system of linear equations

  ! Dummy arguments
  ! a contains the coefficients
  ! b contains the right-hand side
  REAL, DIMENSION(:,:), INTENT(INOUT) :: a
  REAL, DIMENSION(:) :: b
  INTEGER, INTENT(OUT) :: error

  ! Local variables

```

```

REAL, DIMENSION(SIZE(a,1)) :: temp_array ! Automatic array
INTEGER, DIMENSION(1) :: ksave
INTEGER :: i,j,k,n
REAL :: temp,m
CHARACTER :: tempc

! Validity checks
n = SIZE(a,1)

IF (n == 0) THEN
    error = -1
    RETURN
END IF

IF (n /= SIZE(a,2)) THEN
    error = -2
    RETURN
END IF

IF (n /= SIZE(b)) THEN
    error = -3
    RETURN
END IF

! Dimensions of arrays are OK, so go ahead with Gaussian
! elimination
error = 0

DO i=1, n-1
    ! Find row with largest value of |a(j,i)|, j=i, ..., n
    ksave = MAXLOC(ABS(a(i:n, i)))

    ! Check whether largest |a(j,i)| is near zero
    k = ksave(1) + i - 1

    IF ( ABS(a(k,i)) <= 1E-5 ) THEN
        error = -4
        RETURN
    END IF

    !Interchange row i and row k, if necessary
    IF (k /= i) THEN
        temp_array = a(i,:)
        a(i,:) = a(k,:)
        a(k,:) = temp_array
        ! Interchange corresponding elements of b
        temp = b(i)
        b(i) = b(k)
        b(k) = temp
    END IF

    ! Subtract multiples of row i from subsequent rows to
    ! zero all subsequent coefficients of x sub i
    DO j = i+1,n
        m = a(j,i)/a(i,i)
        a(j,:) = a(j,:) - m*a(i,:)
        b(j) = b(j) - m*b(i)
    END DO
END DO

END SUBROUTINE gaussian_elimination

SUBROUTINE back_substitution(a,b,error)
    ! This subroutine performs back substitution once a system
    ! of equations has been reduced by Gaussian elimination

```



```

! Dummy arguments
! The array a contains the coefficients
! The array b contains the right-hand side coefficients.
! and will contain the solution on exit
! error will be set non-zero if an error is found

REAL, DIMENSION(:,:), INTENT(IN) :: a
REAL, DIMENSION(:), INTENT(INOUT) :: b
INTEGER, INTENT(OUT) :: error
! Local variables

REAL :: sum
INTEGER :: i,j,n
error = 0
n = SIZE(b)
! Solve for each variable in turn
b(n) = b(n)/a(n,n)
DO i = n-1,1,-1
! Check for zero coefficient
IF ( ABS(a(i,i)) <= 1E-5 ) THEN
error = -4
RETURN
END IF
sum = b(i)
DO j = i+1,n
sum = sum - a(i,j)*b(j)
END DO
b(i) = sum/a(i,i)
END DO

END SUBROUTINE back_substitution

FUNCTION CpEff(Tpcm,Tl,Cs,C1) RESULT (CpEf)
! FUNCTION INFORMATION:
!     AUTHOR      André Santos
!     DATE WRITTEN May 13, 2013
!     MODIFIED     na
!     RE-ENGINEERED na

! PURPOSE OF THIS FUNCTION:
! find the effective Cp to simulate Phase Change in the PCM, based on PCM temperature

IMPLICIT NONE ! Enforce explicit typing of all variables in this routine
! FUNCTION ARGUMENT DEFINITIONS:
REAL(r64) :: Tpcm
REAL(r64) :: Tl
REAL(r64) :: Cs
REAL(r64) :: C1
REAL(r64) :: CpEf
REAL(r64) :: Ts
REAL(r64) :: Tliq
REAL(r64) :: b
REAL(r64) :: H

! FUNCTION LOCAL VARIABLE DECLARATIONS:
Ts = Tl-1
Tliq = Tl+1
b = 2
H = C1

IF (Tpcm <= Tl) THEN

IF (Tpcm>Ts) THEN
CpEf = (4*(H-Cs*b)/(b * b))*(Tpcm-Ts)+Cs
ELSE
CpEf = Cs

```

```

END IF

ELSE

  IF (Tpcm < Tliq) THEN
    CpEf = 4*(Cs*b-H)/(b * b)*(Tpcm-b/2-Ts)+2*H/b-Cs
  ELSE
    CpEf = Cs
  END IF

END IF

RETURN
END FUNCTION CpEf

!      NOTICE
!
!      Copyright © 1996-2013 The Board of Trustees of the University of Illinois
!      and The Regents of the University of California through Ernest Orlando Lawrence
!      Berkeley National Laboratory. All rights reserved.
!
!      Portions of the EnergyPlus software package have been developed and copyrighted
!      by other individuals, companies and institutions. These portions have been
!      incorporated into the EnergyPlus software package under license. For a complete
!      list of contributors, see "Notice" located in EnergyPlus.f90.
!
!      NOTICE: The U.S. Government is granted for itself and others acting on its
!      behalf a paid-up, nonexclusive, irrevocable, worldwide license in this data to
!      reproduce, prepare derivative works, and perform publicly and display publicly.
!      Beginning five (5) years after permission to assert copyright is granted,
!      subject to two possible five year renewals, the U.S. Government is granted for
!      itself and others acting on its behalf a paid-up, non-exclusive, irrevocable
!      worldwide license in this data to reproduce, prepare derivative works,
!      distribute copies to the public, perform publicly and display publicly, and to
!      permit others to do so.
!
!      TRADEMARKS: EnergyPlus is a trademark of the US Department of Energy.
!
END MODULE HVACsistemaPCM

```

## ANEXO C: Tabela de Capacidade de Arrefecimento

### EBHQ-BV3

#### Cooling

Model	Tamb [°C]	20		25		30		35		40		43	
	LWE [°C]	CC	PI	CC	PI	CC	PI	CC	PI	CC	PI	CC	PI
EBHQ008B*V3 + EKCBX008B*V3	7	6,01	1,62	5,73	1,81	5,43	2,01	5,12	2,22	4,80	2,45	4,59	2,59
	11	6,81	1,63	6,50	1,83	6,17	2,04	5,83	2,27	5,30	2,38	4,98	2,44
	13	7,23	1,63	6,90	1,84	6,56	2,06	6,20	2,29	5,56	2,34	5,18	2,36
	16	7,88	1,62	7,54	1,84	7,17	2,07	6,79	2,32	5,95	2,28	5,46	2,24
	20	8,80	1,61	8,42	1,85	8,03	2,09	7,63	2,35	6,48	2,19	5,82	2,05
EBHQ008B*V3 + EKCBX008B*V3	7	8,24	2,49	7,90	2,74	7,52	3,00	7,10	3,29	5,68	2,92	4,87	2,65
	11	9,26	2,55	8,87	2,82	8,45	3,11	7,79	3,37	6,12	2,86	5,18	2,49
	13	9,79	2,58	9,38	2,86	8,93	3,16	8,14	3,42	6,34	2,83	5,33	2,41
	16	10,6	2,63	10,17	2,92	9,69	3,23	8,68	3,47	6,67	2,77	5,55	2,26
	20	11,7	2,69	11,3	3,00	10,75	3,32	9,39	3,54	7,09	2,67	5,80	2,05

#### Notes:

- Values in the tables can be interpolated but shall NOT be extrapolated.
- Outdoor unit contains an expansion vessel heater: when ambient temperature becomes lower than 4°C: add power input of 50W

#### Symbols:

- CC Cooling capacity at maximum operating frequency, measured acc. EN14511 [kW]
- PI Power input [kW]
- LWE Leaving Water Evaporator temperature [°C]
- Tamb Ambient temperature [°C] RH=85%